

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIANA BISCAIA DA SILVA

HIDRODINÂMICA DA FLUIDIZAÇÃO DE BIOMASSA E INERTES EM LEITO
FLUIDIZADO

CURITIBA

2011

JULIANA BISCAIA DA SILVA

HIDRODINÂMICA DA FLUIDIZAÇÃO DE BIOMASSA E INERTES EM LEITO
FLUIDIZADO

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Mestre, pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Química,
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Knesebeck

CURITIBA

2011

AGRADECIMENTOS

Ao professor Alexandre Knesebeck, pela orientação, apoio, incentivo e confiança para a conclusão deste trabalho.

Aos docentes e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À banca examinadora formada pelos professores Agnes de Paula Scheer e Luiz Fernando de Lima Luz Jr. pelas críticas e sugestões ao trabalho.

À minha família que possibilitou e sempre incentivou meus caminhos e escolhas, pela paciência e por todo amor dedicado.

Ao Edson, pela compreensão, incentivo e carinho em todos os momentos.

Aos amigos e colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, em especial Ediely, Fernanda, Ana Flávia e Andréa, pelo convívio, companheirismo e amizade.

À Klabin Celulose Papel Unidade Monte Alegre, pelo fornecimento do material necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao REUNI, pela concessão da bolsa de mestrado.

A todos que, embora não tenham sido mencionados, contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Foram realizados ensaios experimentais para estudo da hidrodinâmica da fluidização de misturas de biomassa e material inerte. As amostras de biomassa consistiram em restos de madeira originados do corte das árvores e da preparação da madeira, de origens diferentes, sem um padrão uniforme de tamanho e forma; e o material inerte empregado para a fluidização destas foi areia de diâmetros e densidades diferentes. Os materiais foram estudados individualmente quanto ao diâmetro e à velocidade de mínima fluidização (u_{mf}). Foram fluidizadas misturas de 0,5; 1,0; 1,5; 2,6 e 5,3% em massa de biomassa. Os experimentos foram conduzidos em uma coluna cilíndrica de vidro de 15,3 cm de diâmetro e 70 cm de altura. O diâmetro característico (dp, \emptyset) dos dois tipos de biomassa empregados foi obtido indiretamente utilizando os dados experimentais de perda de carga da biomassa em leito fixo e aplicando a equação de Ergun. A u_{mf} da biomassa foi prevista teoricamente pelo balanço de forças no leito. Para o material inerte e para as misturas a u_{mf} foi determinada pela aplicação de métodos gráficos aos dados experimentais da fluidização destes e por modelos matemáticos de previsão da u_{mf} encontrados na literatura. Nas duas situações os modelos teóricos subestimaram os valores da u_{mf} encontrados experimentalmente. Os resultados mostraram comportamentos bem diferentes para cada amostra de biomassa. A biomassa formada por partículas mais longas e finas, com maior teor de umidade e maior densidade apresentou aumento da perda de carga com o aumento da quantidade de biomassa enquanto leito fixo e após o início da fluidização a tendência da perda de carga foi diminuir ao aumentar-se a quantidade de biomassa. Para a biomassa formada por partículas de menor comprimento e maior largura, com menor teor de umidade e menos densas, durante todo o procedimento verificou-se o aumento da perda de carga com a diminuição da quantidade de biomassa. Além disso, também foi avaliada a influência da segregação das partículas e do procedimento de fluidização e de defluidização na u_{mf} .

Palavras - chave: Biomassa. Caracterização de partículas. Fluidização. Perda de carga. Velocidade de mínima fluidização.

ABSTRACT

A set of experiments was carried out to study the hydrodynamics of fluidization of biomass and inert material. The biomass samples consisted of wood residuals from the trees that were cut down and from the preparation of the wood, from different origins, without a uniform pattern of size or shape; the inert material employed to provide the fluidization of the biomass was sand of several diameters and densities. The materials were studied with special concern to its diameter and minimum fluidization velocities (u_{mf}). Mixtures with biomass contents of 0.5, 1.0, 1.5, 2.6 and 5.3% in a mass basis were fluidized. The tests were performed in a cylindrical glass column with 15,3cm of diameter and 70cm high. The characteristic diameter ($dp.\emptyset$) of all the biomass samples analyzed in this study was obtained indirectly by means of experimental data of biomass pressure drop profile in fixed beds and applying the Ergun equation. The biomass u_{mf} was theoretically predicted by the bed forces balance. The inert material and the mixture had its u_{mf} determined by graphical methods applied to the experimental fluidization data and by mathematical methods found in the literature for the u_{mf} prediction. In both situations the theoretical methods underestimated the u_{mf} values obtained in laboratory. The results showed very different behaviors for each biomass sample. The biomass formed by longer and thinner particles, with greater moisture and greater density, exhibited growth in the pressure drop in fixed bed regime. After the beginning of the fluidization the pressure drop in the bed tends to reduce with the growth of the biomass content in the mixture. The biomass consist by smaller and thicker particles, with lesser moisture and densities, exhibited growth in the pressure drop profile with the reduction of the biomass content. The influence of particle segregation, fluidization procedures and defluidization procedures on the u_{mf} was also analyzed.

Keywords: biomass, fluidization, minimum fluidization velocity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Comparação entre caldeiras e suas respectivas velocidades do gás e das partículas.	17
Figura 2. 2 – Esquema de uma caldeira de leito fluidizado borbulhante.	18
Figura 2. 3 – Esquema de uma caldeira de leito fluidizado circulantes e sistemas auxiliares .	20
Figura 2. 4 – Comportamento da queda de pressão em função da velocidade de fluidização para diferentes regimes	24
Figura 2. 5 – Diagrama simplificado da classificação de partículas de Geldart para fluidização gás-sólido	26
Figura 2. 6 – Perda de carga no leito na transição de leito fixo para leito fluidizado.....	29
Figura 2. 7 – Curvas características de fluidização	30
Figura 3. 1 – Equipamento para medição de queda de pressão.....	42
Figura 3. 2 – Telas que compõem os distribuidores (2 mm; 0,5 mm e <i>nylon</i> , respectivamente)	42
Figura 3. 3 – Análise granulométrica das amostras.....	45
Figura 3. 4 – Exemplos das amostras de areia utilizadas.....	46
Figura 3. 5 – Exemplos das amostras de biomassa utilizadas	47
Figura 4. 1 – Pontos experimentais de perda de carga no leito para a amostra C1	53
Figura 4. 2 – Pontos experimentais de perda de carga no leito para a amostra C2	53
Figura 4. 3 – Critérios de avaliação aplicados as dados da amostra C1	54
Figura 4. 4 – Critérios de avaliação aplicados as dados da amostra C2	55
Figura 4. 5 – Pontos experimentais e modelo ajustado para a amostra C1	56
Figura 4. 6 – Pontos experimentais e modelo ajustado para a amostra C2	56
Figura 4. 7 – Dados de perda de carga para a amostra A1. (F – fluidização e D – defluidização)	59
Figura 4. 8 – Dados de perda de carga para a amostra A2. (F – fluidização e D – defluidização)	60
Figura 4. 9 – Dados de perda de carga para a amostra B1. (F – fluidização e D – defluidização)	60

Figura 4. 10 – Dados de perda de carga para a amostra B2. (F – fluidização e D – defluidização)	61
Figura 4. 11 – Dados de fluidização para a amostra B2 e respectivas linhas de tendência	63
Figura 4. 12 – Visualização do procedimento utilizado para determinação das u_{mf} das amostras de areia.....	66
Figura 4. 13 – Resultados das u_{mf} obtidas experimentalmente e calculadas para a amostra A1	66
Figura 4. 14 – Resultados das u_{mf} obtidas experimentalmente e calculadas para a amostra A2	67
Figura 4. 15 – Resultados das u_{mf} obtidas experimentalmente e calculadas para a amostra B1	67
Figura 4. 16 – Resultados das u_{mf} obtidas experimentalmente e calculadas para a amostra B2	68
Figura 4. 17 – Dados de perda de carga em função da velocidade do ar para a amostra AC1	70
Figura 4. 18 – Dados de perda de carga em função da velocidade do ar para a amostra AC2	71
Figura 4. 19 – Dados de fluidização e defluidização para todas as porcentagens da mistura AC1 e respectivas linhas de tendência	74
Figura 4. 20 – Dados de fluidização e defluidização para todas as porcentagens da mistura AC2 e respectivas linhas de tendência	75
Figura 4. 21 – Comparação entre as u_{mf} encontradas graficamente e calculados pelos modelos empíricos para a mistura AC1	80
Figura 4. 22 – Comparação entre as u_{mf} encontradas graficamente e calculados pelos modelos empíricos para a mistura AC2	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Definição de diâmetros equivalentes para partículas irregulares	22
Tabela 2. 2 – Valores de esfericidade para alguns materiais.....	23
Tabela 2. 3 – Modelos experimentais para a velocidade de mínima fluidização	31
Tabela 3. 1 – Massa específica das amostras utilizadas.....	44
Tabela 3. 2 – Peneiras padrão utilizadas	45
Tabela 3. 3 – Faixa de diâmetros e diâmetros médios das amostras	46
Tabela 3. 4 – Massa específica e valores de umidade das amostras utilizadas	47
Tabela 4. 1 – Alturas de leito (L) dos testes realizados para as amostras C1 e C2.....	54
Tabela 4. 2 – Parâmetros médios utilizados e diâmetros característicos calculados	55
Tabela 4. 3 – Velocidades de mínima fluidização teóricas para as amostras de biomassa pura	57
Tabela 4. 4 – Alturas de leito (L) dos testes realizados para as amostras A1, A2, B1 e B2. ...	59
Tabela 4. 5 – Resumo dos valores de u_{mf} determinados graficamente segundo Chiba <i>et al.</i> (1979)	62
Tabela 4. 6 – Resumo dos valores de u_{mf} determinados graficamente segundo Kunii e Levenspiel (1991)	64
Tabela 4. 7 – Resumos dos valores de u_{mf} determinados graficamente segundo Chiba <i>et al.</i> (1979) e Kunii e Levenspiel (1991) (F – Fluidização, D – Defluidização)	76
Tabela 4. 8 – Valores de u_{mf} calculados por Otero e Corella (1971)	77
Tabela 4. 9 – Valores de u_{mf} calculados por Otero e Corella modificado	78
Tabela 4. 10 – Valores de u_{mf} calculados por Cheung <i>et al.</i> (1974).....	78
Tabela 4. 11 – Valores de u_{mf} calculados por Rao e Bheemarasetti (2001)	79
Tabela 4. 12 – Valores de u_{mf} calculados por Chiba <i>et al.</i> (1979)	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Gregas

β	Relação entre os diâmetros da seção de entrada e da garganta do Venturi (adimensional)
ΔP	Queda de pressão no Leito (Pa)
ΔP_{coluna}	Queda de pressão na coluna vazia (Pa)
ε	Porosidade (adimensional, Equação 2.5)
ε_{mf}	Porosidade na velocidade de mínima fluidização (adimensional)
ϕ	Esfericidade (adimensional, Equação 2.1)
κ	Relação c_p/c_v (adimensional)
μ	Viscosidade do fluido (Pa.s)
π	Quociente entre o perímetro de uma circunferência e o seu diâmetro (= 3,1416)
ρ_f	Massa específica do fluido (kg/m^3)
ρ_{fl}	Massa específica do componente <i>flotsam</i> (kg/m^3)
ρ_i	Massa específica do componente <i>i</i> (kg/m^3)
ρ_j	Massa específica do componente <i>jetsam</i> (kg/m^3)
ρ_p	Massa específica do sólido (kg/m^3)
$\rho_{p,eff}$	Massa específica do sólido (kg/m^3) (Equação 2.14)

Grupos Adimensionais

Ar	Número de Arquimedes (Equação 2.6)
Re	Número de Reynolds da partícula
Re_{mf}	Número de Reynolds da partícula na velocidade de mínima fluidização (Equação 2.7)

Abreviações

<i>BFBC</i>	Bubbling Fluidized Bed Combustion
<i>CFBC</i>	Circulating Fluidized Bed Combustion
u_{mf}	Velocidade de mínima fluidização (m/s)

Outros Símbolos

A_c	Área da seção transversal do cilindro ou permeâmetro (m ²)
A_G	Área da seção transversal da garganta do Venturi (m ²)
C	Coefficiente de descarga do Venturi (adimensional)
cp	Calor específico do fluido à pressão constante (J/kg.K)
cv	Calor específico do fluido à volume constante (J/kg.K)
d_a	Diâmetro da área projetada (m)
D_c	Diâmetro da coluna (m)
d_p	Diâmetro da partícula (m)
Dp	Diâmetro médio entre a peneira em que a partícula ficou retida e a peneira com abertura imediatamente maior (m)
d_j	Diâmetro do componente <i>jetsam</i> (m)
d_{fl}	Diâmetro do componente <i>flotsam</i> (m)
d_{pi}	Diâmetro do componente i (m)
$d_{p,eff}$	Diâmetro efetivo da partícula (m) (Equação 2.13)
d_s	Diâmetro superficial (m)
d_{st}	Diâmetro de Stokes (m)
d_{sv}	Diâmetro de Sauter (m)
d_v	Diâmetro volumétrico (m)
d_p, \emptyset	Diâmetro característico da biomassa (m)
g	Aceleração da gravidade (=9,18 m/s ²)
k	Constante (adimensional, Equação 2.13)
L	Altura do leito (m)

M_p	Massa total de partícula (kg)
N_{fl}	Variável definida pela equação 2.18
p	Constante definida (adimensional, Equação 2.10)
P_1	Pressão na seção de entrada do Venturi (Pa)
P_2	Pressão na garganta do Venturi (Pa)
Q	Vazão volumétrica do Fluido (m ³ /s)
q_m	Fluxo do fluido em massa (kg/s)
q_v	Fluxo do fluido em volume (m ³ /s)
S_p	Área superficial de uma partícula (m ²)
T	Temperatura na saída do compressor (K)
u	Velocidade do fluido (m/s)
u_{fc}	Velocidade de fluidização completa (m/s)
u_{fl}	Velocidade de mínima fluidização do componente <i>flotsam</i> (m/s)
u_j	Velocidade de mínima fluidização do componente <i>jetsam</i> (m/s)
u_{mf}	Velocidade de mínima fluidização (m/s)
$\overline{u_{mf}}$	Velocidade de mínima fluidização da mistura (m/s)
$u_{mf,b}$	Velocidade de mínima fluidização das partículas maiores (m/s)
$u_{mf,i}$	Velocidade de mínima fluidização do componente <i>i</i> (m/s)
$u_{mf,s}$	Velocidade de mínima fluidização das partículas menores (m/s)
u_t	Velocidade terminal da partícula (m/s)
V_{fl}	Fração volumétrica do componente <i>flotsam</i>
V_p	Volume da partícula (m ³)
V_T	Volume total do leito (m ³)
V_{TP}	Volume total das partículas do leito (m ³)
x_b	Fração mássica das partículas maiores
x_i	Fração mássica do componente <i>i</i> na mistura
x_j	Fração mássica retida na peneira <i>j</i>
x_s	Fração mássica das partículas menores
w_i	Massa de partículas do componente <i>i</i> (kg)
Y	Fator de compressibilidade (adimensional)

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS	8
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CALDEIRAS DE LEITO FLUIDIZADO	15
2.1.1 Caldeiras de leito fluidizado borbulhante	17
2.1.2 Caldeiras de leito fluidizado circulante	19
2.2 PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS	20
2.2.1 Propriedades físicas de uma partícula isolada.....	20
2.2.2 Propriedades hidrodinâmicas de partículas sólidas	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	41
3.2 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS	43
3.2.1 Amostras de inertes	43
3.2.2 Amostras de biomassa	46
3.2.3 Amostras de misturas.....	48
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	48
3.4 CÁLCULO DA VELOCIDADE DO AR	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52

4.1 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO CARACTERÍSTICO DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA.....	52
4.2 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA.....	57
4.3 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE AREIA.....	58
4.3.1 Determinação gráfica da velocidade de mínima fluidização das amostras de areia	61
4.3.2 Determinação teórica da velocidade de mínima fluidização das amostras de areia	64
4.4 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO DAS MISTURAS DE AREIA E BIOMASSA	68
4.4.1 Determinação gráfica da velocidade de mínima fluidização das amostras de mistura de areia e biomassa.....	72
4.4.2 Determinação teórica da velocidade de mínima fluidização das amostras de mistura de areia e biomassa.....	76
5 CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	85
ANEXOS	90

1 INTRODUÇÃO

Em virtude do atual momento de conscientização ambiental e da busca contínua de fontes de energias alternativas, a utilização de resíduos derivados de processos produtivos torna-se um dos principais alvos da indústria brasileira e mundial. O setor papelero é um dos mais importantes no cenário mundial e um grande consumidor nacional de energia. A queima de subprodutos e de resíduos do seu processo contribui para minimizar a dependência de combustíveis fósseis, como gás natural e óleo combustível (Macedo, 2006).

Os restos de madeira originados do corte das árvores e da preparação da madeira antes desta entrar no processo, denominados biomassa, são um exemplo de resíduo gerado visto como fonte energética alternativa. Tendo em vista a diminuição das fontes não renováveis de energia, a biomassa é vista como o recurso energético mais promissor para diminuir a emissão dos gases causadores do efeito estufa. O suprimento energético mundial é dominado por combustíveis fósseis há décadas (em torno de 80% do total utilizado), porém, a contribuição da biomassa já está entre 10 e 15% desta demanda (Cui e Grace, 2006; Khan *et al.*, 2009).

Dentre as tecnologias utilizadas para combustão de biomassa, os leitos fluidizados se destacam como os mais vantajosos. Dentre essas vantagens estão o baixo impacto ambiental, a alta flexibilidade do combustível a ser utilizado, o favorável contato gás-sólido, a facilidade de controle e a distribuição homogênea da temperatura e a alta eficiência de combustão devido a elevados coeficientes de transferência de calor e de massa (Resende, 2003; Oka, 2004; Macedo, 2006 e Araújo, 2008).

As partículas de biomassa apresentam geralmente características irregulares e peculiares quando comparadas ao material particulado comumente manipulado na indústria química. Apesar do desenvolvimento de diversos trabalhos nesta área, o estudo da caracterização das partículas de biomassa e do seu comportamento hidrodinâmico ainda é escasso. Devido ao insuficiente conhecimento nessa área, freqüentemente são aplicados conceitos e metodologias da fluidização de partículas convencionais para os projetos e operações envolvendo a biomassa, o que provoca uma generalização do comportamento das partículas e faz com que parâmetros importantes sejam subestimados ou superestimados (Cui e Grace, 2006).

O entendimento da hidrodinâmica é decisivo para o êxito de projetos e dos processos que utilizam leito fluidizado, por isso é importante empreender pesquisas diretas no aperfeiçoamento da caracterização e da modelagem hidrodinâmica da fluidização de biomassa (Cui e Grace, 2006; Khan *et al.*, 2009).

O presente trabalho visa o estudo hidrodinâmico global de leitos fluidizados industriais. Os objetivos específicos incluem: a caracterização das partículas de inertes, a determinação de um diâmetro característico representativo das amostras de biomassa, previsão teórica da velocidade de mínima fluidização das amostras de biomassa, determinação das velocidades de mínima fluidização das amostras de inertes e das misturas de biomassa e inertes a partir dos dados experimentais, e teoricamente a partir da utilização de modelos teóricos, além da análise qualitativa da estabilidade da fluidização, da influência do fenômeno da segregação e da diferença entre a fluidização e a defluidização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo procura resumir os principais estudos encontrados em literatura com respeito a caldeiras de leito fluidizado, no intuito de contextualizar os objetivos do trabalho, e às propriedades físicas e hidrodinâmicas das partículas utilizadas. Alguns trabalhos são qualitativos, considerando os fenômenos básicos do sistema; e outros quantitativos com o objetivo de medir parâmetros e aplicar modelos matemáticos para a descrição e projeto desses sistemas. Procurou-se dar ênfase, quando possível, em estudos de sistemas que se assemelham ao abordado neste trabalho.

2.1 CALDEIRAS DE LEITO FLUIDIZADO

Até meados dos anos de 1970, devido ao preço reduzido dos combustíveis líquidos e gasosos e à redução na utilização do carvão nas indústrias, as tecnologias para a queima de combustíveis sólidos estavam ultrapassadas e já não atendiam às exigências de preservação ambiental, além de seu desenvolvimento estar paralisado. Com o acontecimento da crise energética, causada por um aumento repentino dos preços dos combustíveis derivados do petróleo, os principais países do mundo foram obrigados a reconsiderar suas políticas energéticas. A partir da necessidade de se atingir o mesmo nível tecnológico dos equipamentos existentes, as caldeiras de leito fluidizado começaram a ser desenvolvidas e buscou-se a utilização de recursos energéticos renováveis (Oka, 2004).

As caldeiras de leito fluidizado alcançaram seu ápice na última década. Uma das razões é que se podem utilizar tipos diferentes de combustíveis, numa gama que varia de combustíveis de baixa qualidade calorífica e alta umidade até combustíveis de uso tradicional, mantendo alto grau de eficiência. Além do que, a temperatura de combustão é baixa, o que induz baixas emissões de NOx, e podem possuir injeção de calcário dentro da fornalha, o que auxilia na redução de emissões de SOx (Macedo, 2006).

O princípio da caldeira de leito fluidizado baseia-se em uma camada fluidizada de inertes (areia ou material semelhante), onde o combustível é introduzido e queimado. O ar de combustão é insuflado através da camada de inertes, por orifícios abertos na parte de baixo da

caldeira. A intensa mistura de partículas assegura que em todo o espaço ocupado pelo leito fluidizado a combustão ocorre sob as mesmas condições favoráveis – mesma temperatura e quantidade suficiente de oxigênio. As características do estado fluidizado são determinadas de acordo com a velocidade do gás (velocidade de fluidização), como pode ser observado na Figura 2.1 (Oka, 2004; Macedo, 2006), na qual observam-se também as diferenças entre as caldeiras utilizadas para queima de biomassa. As caldeiras de leito fluidizado possuem as seguintes propriedades (Oka, 2004):

- flexibilidade de combustíveis, pois podem-se utilizar diferentes combustíveis na mesma caldeira e queimar de forma efetiva misturas de biomassas e resíduos de combustíveis, domésticos e industriais;
- alta capacidade térmica do material do leito e intensa troca térmica, o que possibilita a queima de carvões de baixa qualidade, com alto grau de umidade, cinzas e enxofre, de forma efetiva e barata;
- alta eficiência de combustão e baixas emissões de NOx e de SOx por retirada de enxofre durante a combustão, empregando calcário junto com o material injetado no leito;
- ampla faixa de aceitação de partículas de combustíveis, não sendo necessário pulverizar o material.

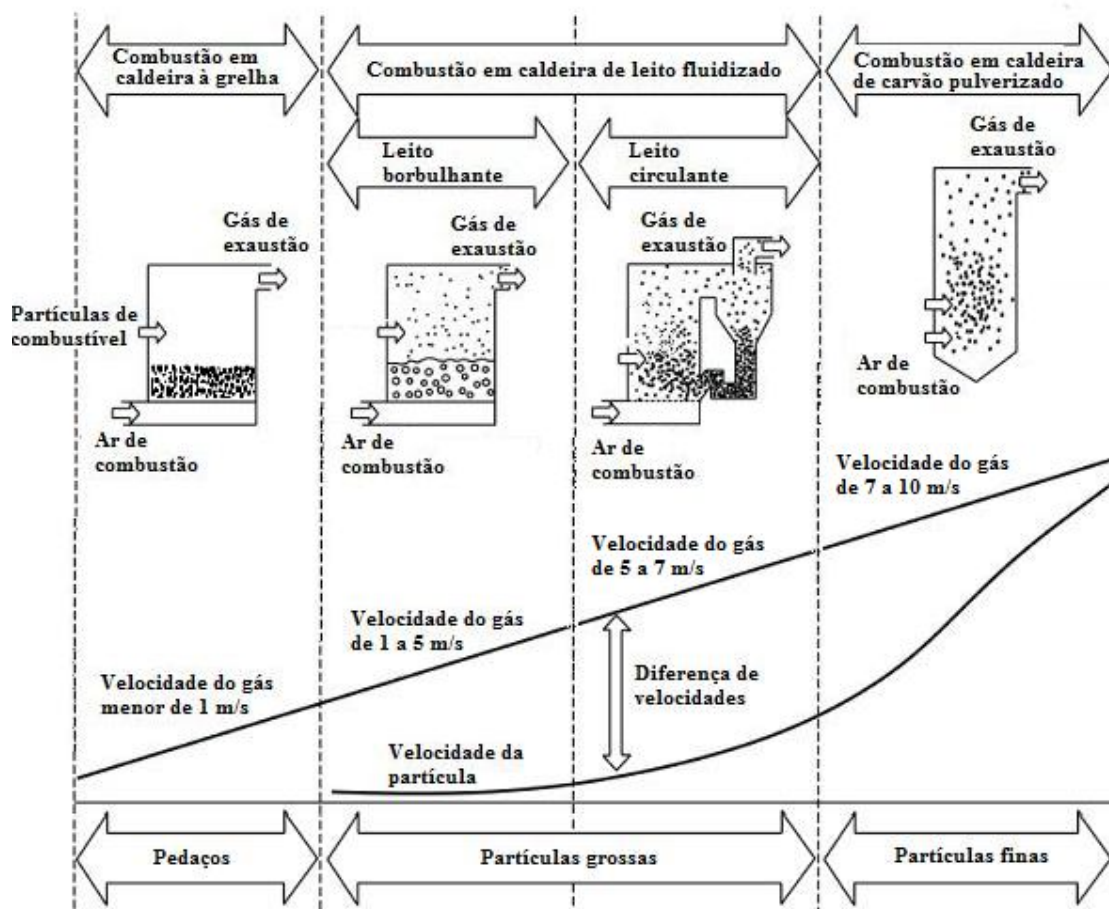


Figura 2. 1 – Comparação entre caldeiras e suas respectivas velocidades do gás e das partículas.
FONTE: Macedo (2006)

2.1.1 Caldeiras de leito fluidizado borbulhante

A primeira geração de caldeiras de leito fluidizado é chamada de borbulhante, ou BFBC (*Bubbling Fluidized Bed Combustion*) e pode ser ilustrada de acordo com a Figura 2.2. Neste tipo de caldeira a velocidade do ar é menor que a velocidade de transporte das partículas, a combustão ocorre principalmente no leito fluidizado de material inerte. Acima do leito existe um espaço livre com uma concentração muito pequena de sólidos particulados, onde a combustão das partículas finas de combustível e de voláteis continua através da introdução de ar secundário. Perdas de energia devido às partículas não queimadas que são arrastadas com os produtos da combustão podem ser reduzidas através da recirculação e reintrodução destas dentro da fornalha, aumentando a eficiência da caldeira. O leito é pré-aquecido usando um queimador externo de gás natural, propano ou óleo combustível. Gás de

saída da chaminé é utilizado para ajudar na fluidização e aquecer o leito até a temperatura de ignição do combustível. Queima suplementar pode ser usada para aquecer o leito para manter a temperatura de combustão da biomassa. As superfícies das paredes da fornalha circundante ao leito fluidizado nem sempre são suficientes para transferir a quantidade de calor necessária para manter a temperatura do leito, então se faz necessária a introdução de trocadores de calor imersos no leito fluidizado (Oka, 2004; Macedo, 2006).

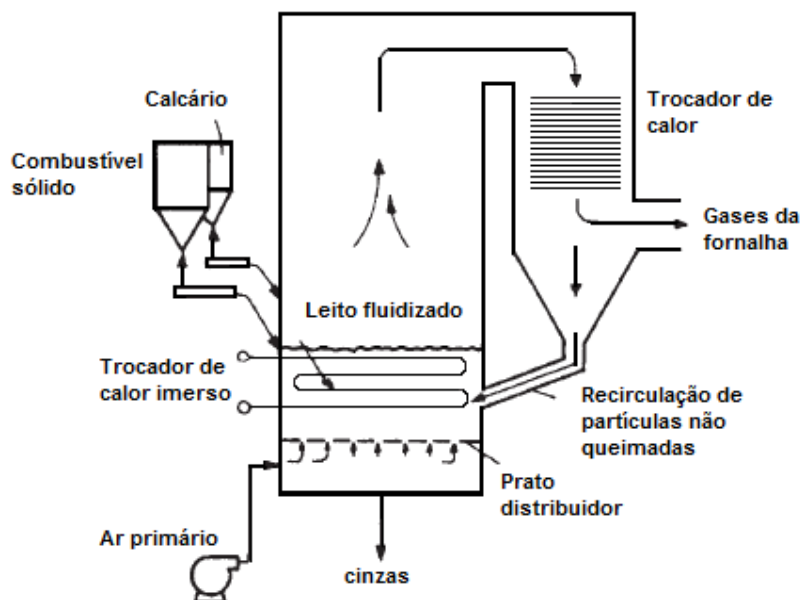


Figura 2. 2 – Esquema de uma caldeira de leito fluidizado borbulhante.
FONTE: Oka (2004) (Adaptado pelo autor)

Comparando-se com as caldeiras convencionais de queima de carvão, a primeira geração de caldeiras FBC é superior em todas as características. O grande número destas caldeiras instaladas e suas performances confirmam que este tipo de caldeira, para pequenas e médias capacidades, podem efetivamente competir no mercado, sobrepondo às caldeiras convencionais. Comumente, caldeiras convencionais que queimam combustíveis sólidos ou líquidos podem ser re-projetadas e adaptadas para queima em leito fluidizado borbulhante (Oka, 2004).

2.1.2 Caldeiras de leito fluidizado circulante

A segunda geração de caldeiras de combustão em leito fluidizado, também chamadas de circulantes ou CFBC (*Circulating Fluidized Bed Combustion*), são um aprimoramento da primeira geração e começaram a ser utilizadas no final dos anos 70. As CFBCs são caracterizadas por uma alta velocidade de arraste entre o gás e os sólidos, e pela extensa mistura destes, gerando intensa transferência de calor do gás para as partículas e alta taxa de combustão. A combustão ocorre numa câmara vertical, a qual possui uma seção transversal relativamente pequena e uma altura substancial. A velocidade do ar é alta, sendo que as partículas de tamanhos médios e finos são carregadas para fora da fornalha, e posteriormente são separadas do gás de exaustão através de um ciclone instalado após a caldeira. As partículas separadas no ciclone são enviadas novamente para a parte de baixo do leito, como partícula não queimada, contribuindo para combustão completa deste material. Um esquema de uma CFBC convencional é mostrado na Figura 2.3, juntamente com um sistema auxiliar para caldeiras (Oka, 2004; Macedo, 2006).

As partículas inertes do meio são menores que na primeira geração e são removidas da câmara de combustão juntamente com as partículas finas de combustíveis não queimadas. Em um ou mais ciclones o material sólido é separado dos produtos de combustão gasosos e é reintroduzido na fornalha. Assim, a recirculação das partículas sólidas é realizada num circuito fechado. Em caldeiras CFBCs não estão presentes trocadores de calor de superfície transversal na direção do movimento da partícula no circuito primário de circulação de sólidos, logo, a erosão das superfícies do trocador de calor não é tão evidenciada como no caso das caldeiras borbulhantes.

As CFBCs têm vantagem em relação às BFBCs pelos seguintes itens: maior eficiência de combustão, menor consumo de calcário como material do leito, emissões de NOx menores, respostas mais rápidas para mudança de combustíveis e geralmente as BFBCs operam numa faixa abaixo de 100 MW, enquanto as CFBCs operam numa faixa entre 100 a 500 MW.

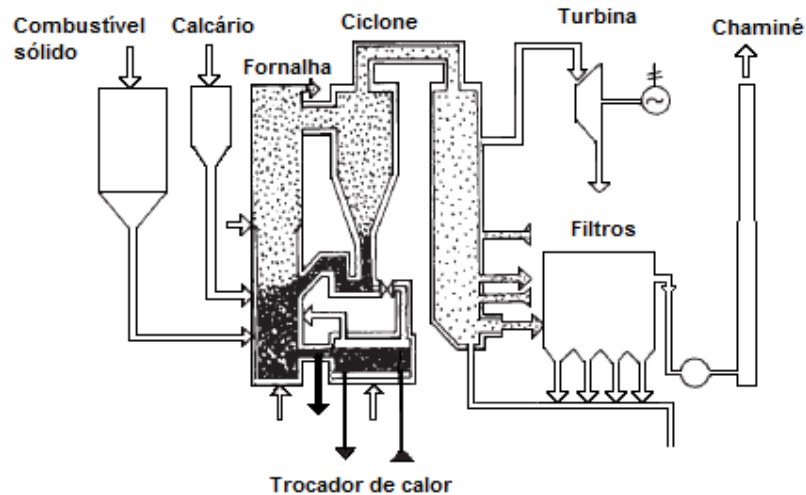


Figura 2. 3 – Esquema de uma caldeira de leito fluidizado circulantes e sistemas auxiliares
 FONTE: Oka (2004) (Adaptado pelo autor)

2.2 PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

O conhecimento das características físicas das partículas que participam do processo de leito fluidizado é fundamental, pois interfere diretamente na hidrodinâmica, na transferência de calor e na movimentação das partículas do leito fluidizado.

A biomassa utilizada nos processos industriais em geral é de difícil caracterização, pois é constituída de partículas numa ampla faixa de tamanhos além de não apresentarem regularidade no formato. Já os materiais inertes utilizados no processo podem ser facilmente caracterizados individualmente devido a sua homogeneidade. As características principais, abordadas a seguir, são o tamanho e a forma.

2.2.1 Propriedades físicas de uma partícula isolada

2.2.1.1 Tamanho

A caracterização de uma partícula com relação ao tamanho é definida por uma ou mais dimensões lineares. Por exemplo, uma esfera e um cubo são caracterizados apenas com

uma dimensão, diâmetro e aresta, respectivamente, assim como um cone é definido por duas dimensões, diâmetro da base e altura. No caso de partículas irregulares estas são caracterizadas, em geral, com base em alguma propriedade de referência que depende da aplicação pretendida. Dentre as várias definições de diâmetros que são reportadas para esta caracterização, a Tabela 2.1 apresenta as mais comuns.

Para as partículas de inerte utilizadas nesse trabalho foi considerado como diâmetro efetivo da partícula (d_p) o diâmetro de peneira, calculado como consta na Tabela 2.1.

2.2.1.2 Forma

A esfericidade (ϕ) é uma das maneiras mais utilizadas para expressar a forma de uma partícula individual. É uma propriedade independente do seu tamanho e que tem forte influência na hidrodinâmica de uma partícula. A esfericidade é definida pela razão entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula pela área superficial da partícula. Para partículas esféricas a esfericidade é igual a 1 e para as demais formas é sempre menor que 1, e é dada por (REINA, 2000):

$$\phi = \frac{\text{Área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula}}{\text{Área superficial da partícula}} = \left(\frac{d_v}{d_s} \right)^2 \quad (2.1)$$

A esfericidade é uma característica difícil de ser determinada para partículas irregulares devido à dificuldade de se determinar sua área superficial por medição. Uma das metodologias utilizadas é através da medição da queda de pressão em um leito, juntamente com o uso de equações empíricas elaboradas para esferas, como a equação de Ergun, por exemplo. Porém, o uso deste método faz com que o parâmetro passe a ser puramente empírico (Motta, 2009). Alguns valores típicos de esfericidade são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2. 1 – Definição de diâmetros equivalentes para partículas irregulares

Nome	Definição
Diâmetro Volumétrico	Diâmetro de uma esfera que tem o mesmo volume da partícula: $d_v = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3}$
Diâmetro Superficial	Diâmetro de uma esfera que tem a mesma área superficial da partícula: $d_s = \left(\frac{S_p}{\pi} \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{\phi} \left(\frac{6}{\pi} V_p \right)^{2/3} \right)^{1/2}$
Diâmetro de Sauter	É o diâmetro de uma esfera que tem a mesma razão entre a área superficial e o volume da partícula: $d_{sv} = \left(\frac{6V_p}{S_p} \right) = \frac{d_v^3}{d_s^2} = \phi \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3}$
Diâmetro de Stokes	Diâmetro resultante do uso da lei de Stokes para queda livre, calculado por experimentos efetuados no regime de Stokes. $d_{st} = \sqrt{\frac{18\mu \cdot u_t}{(\rho_p - \rho_f)g}}$
Diâmetro da área projetada	Diâmetro de uma esfera que tem a mesma área projetada que uma partícula vista na direção perpendicular ao plano que tem a melhor estabilidade da partícula: $d_a = \sqrt{\frac{4S_p}{\pi}}$
Diâmetro de Peneira	É a largura mínima de abertura de uma tela de peneira com aberturas de formato quadrado, a partir da qual a partícula consegue atravessar: $d_p = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{x_j}{(Dp)_j}}$

FONTE: Allen (1990) (adaptado pelo autor)

Tabela 2. 2 – Valores de esfericidade para alguns materiais

<i>Material</i>	<i>Esfericidade (Φ)</i>
Partículas de areia arredondadas	0,83
Areia (média para todos os tipos)	0,75
Pó de carvão natural	0,73
Vidro quebrado	0,63
Carvão em pedra	0,54
Sílica em gel	0,18 – 0,33

FONTE: Oka (2004) (Adaptado pelo autor)

2.2.2 Propriedades hidrodinâmicas de partículas sólidas

O leito fluidizado é formado por um fluido, geralmente um gás, escoando no sentido ascendente através de um leito de partículas suportadas por um distribuidor. O estado fluidizado é o oposto do estado de leito fixo. O leito fixo é caracterizado por partículas imóveis que se sobrepõem umas sobre as outras, com vários pontos de contato entre elas, nos quais são exercidas e transmitidas forças friccionais, de adesão e o peso das partículas. No estado fluidizado, entretanto, as partículas flutuam em movimentos caóticos, colidindo umas com as outras, mas suas interações são breves e as forças interparticulares são fracas (Geldart, 1986).

Durante o início do movimento, em baixas velocidades, o gás percorre o leito fixo através dos caminhos livres dos espaços interpartícula. A porosidade uniforme do leito gera uma resistência significativa para o fluxo de gás, ocorre uma distribuição uniforme deste por todo o leito e as partículas permanecem em repouso. À medida que vazão do fluido aumenta ocorre um aumento proporcional na velocidade em que o fluido escoar no meio poroso e no gradiente de pressão total ao longo do leito (Resende, 2003).

O ponto em que a pressão total iguala-se ao peso por unidade de área da coluna de sólidos é considerado, de forma genérica, o ponto de mínima fluidização, no qual é atingida a fluidização borbulhante. Neste ponto, a força de arraste exercida pelo fluido ascendente é suficiente para suportar o peso do sólido, diminuindo a força de interação partícula-partícula. Ao se aumentar ainda mais a vazão do fluido, o leito expande-se e o aumento da pressão não será mais proporcional, uma vez que se altera a porosidade do sistema. A queda de pressão

total mantém-se praticamente constante. O limite deste processo é a velocidade terminal dos sólidos, quando o leito fluidizado passa para leito de arraste (Oka, 2004).

Existem vários regimes da mistura gás/sólido possíveis de se encontrar. O regime irá depender da orientação do equipamento, da direção do fluxo de gás e da direção relativa entre o fluxo de gás e as partículas. Nas caldeiras de leito fluidizado o regime está relacionado principalmente com a condição de a fluidização ocorrer de forma borbulhante ou rápida (Oka, 2004). O comportamento da queda de pressão durante a passagem do gás entre as partículas para diferentes regimes pode ser observado na Figura 2.4.

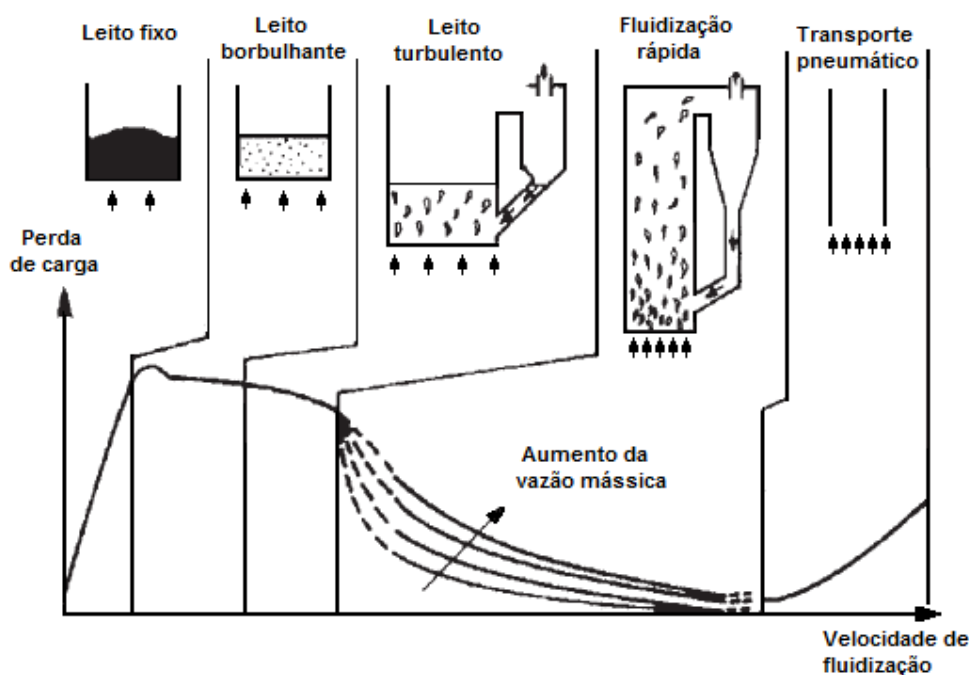


Figura 2. 4 – Comportamento da queda de pressão em função da velocidade de fluidização para diferentes regimes

FONTE: Oka (2004) (Adaptado pelo autor)

No intervalo entre a velocidade de mínima fluidização e a velocidade de transporte das partículas existem dois regimes essencialmente diferentes: o leito fluidizado borbulhante e o de leito fluidizado turbulento. A transição de borbulhante para turbulento começa quando, devido ao aumento da velocidade de fluidização, as bolhas grandes começam a se romper e se dividir em bolhas menores de diferentes formatos. No regime borbulhante, o rompimento das bolhas é equilibrado pelo processo de coalescência das bolhas. Quando o leito torna-se homogeneizado sem a presença de bolhas grandes o regime turbulento é atingido (Oka, 2004).

O regime turbulento é mantido até que o número de partículas que deixam o leito cresce abruptamente. A elutriação das partículas é mais intensa no regime turbulento, a densidade do leito fluidizado mantém-se alto e a superfície livre pode ser identificada. No momento em que a velocidade do gás atinge a velocidade terminal da maioria das partículas e dos aglomerados formados ocorre a elutriação destas e então se atinge a velocidade de transporte e o regime turbulento torna-se um regime de fluidização rápida (Oka, 2004).

As caldeiras BFBCs são projetadas para operar no regime turbulento e o regime de fluidização rápido é utilizado nas caldeiras CFBCs (Oka, 2004).

2.2.2.1 Comportamento de diferentes materiais durante a fluidização

Nem toda partícula, quando submetida à fluidização gasosa, comporta-se da mesma maneira. Dados obtidos na fluidização de um determinado material não podem, a princípio, ser extrapolados para outro. Visando tornar as generalizações possíveis, ou pelo menos minimizar as chances de erro, Geldart (1973) classificou o comportamento de sólidos fluidizados por gases em quatro categorias: A, B, C e D. Apesar da existência de outros critérios de classificação, a classificação de grupos de Geldart (1973) é amplamente aceita e citada com maior frequência na literatura. Essa caracterização está representada na Figura 2.5 e é detalhada a seguir (Geldart, 1986):

- Grupo A: Compreende materiais com partículas pouco coesas, de tamanho pequeno e baixa densidade ($<1400 \text{ kg/m}^3$). Durante a fluidização homogênea destes materiais atinge-se uma expansão substancial do leito antes da ocorrência das bolhas. A velocidade de ascensão da bolha excede a velocidade intersticial do gás. As bolhas aparecem nas velocidades superiores à de mínima fluidização.
- Grupo B: Inclui uma grande quantidade de materiais de partículas de tamanho médio e média densidade. Suas forças de coesão interpartículas são desprezíveis. Diferentes tipos de areias são bons representantes deste grupo. Bolhas ocorrem imediatamente após a velocidade de mínima fluidização ser atingida e ascendem com velocidade maior que a velocidade intersticial do gás. A expansão do leito na fluidização destes materiais é pequena ou inexistente e não há evidências de um tamanho máximo para as bolhas.

- Grupo C: Inclui partículas muito pequenas e coesivas. A fluidização das partículas deste grupo é extremamente difícil devido às forças interpartícula serem maiores que as forças exercidas pelo fluido. Em geral são partículas muito leves, com alto grau de umidade e de formato muito irregular. Não há formação de bolhas e é comum ocorrer a formação de “*plug*” e de canais preferenciais no leito. A perda de carga real do leito é menor que a teórica (peso por unidade de área da coluna) prevista. Necessitam da adição de um segundo material inerte para alcançar uma fluidização eficiente.
- Grupo D: Compreende partículas grandes e de alta densidade. Sua principal característica é o fato de as bolhas ascenderem lentamente, numa velocidade muito menor que a velocidade intersticial do gás. O grau de mistura do leito é muito pequeno. A presença de partículas dentro de uma grande faixa granulométrica aumenta a ocorrência de segregação entre elas.

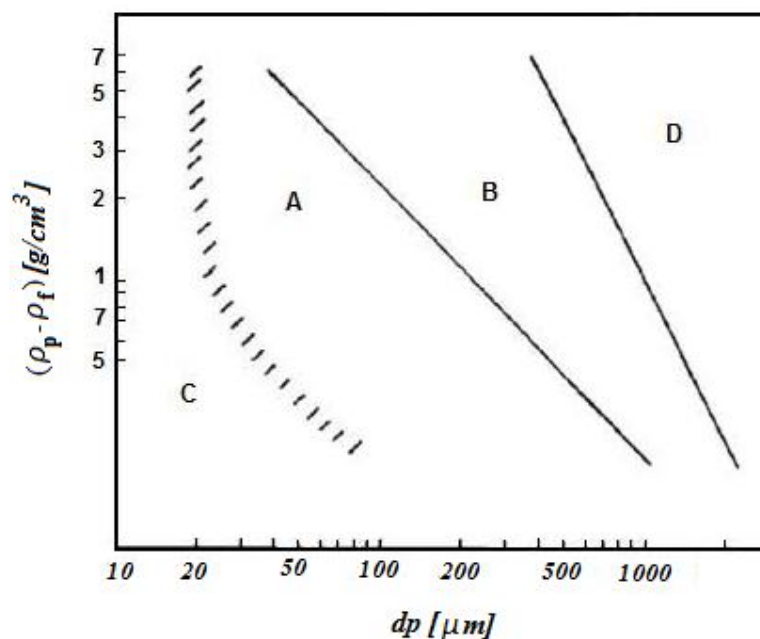


Figura 2. 5 – Diagrama simplificado da classificação de partículas de Geldart para fluidização gás-sólido
 FONTE: Oka (2004)

As caldeiras de leito fluidizado normalmente utilizam partículas dos grupos A, B e D desta classificação. Nas caldeiras borbulhantes são utilizadas principalmente as do grupo B e eventualmente partículas próximas ao grupo D. Caldeiras circulantes também utilizam em sua

maioria partículas do grupo B, mas que se aproximam das características do grupo A (Geldart, 1986; Oka, 2004).

2.2.2.2 Velocidade de mínima fluidização

Para sistemas monodispersos

A velocidade de mínima fluidização das partículas é um parâmetro hidrodinâmico que influencia fortemente o comportamento de leitos fluidizados. Por essa razão, a predição exata desta é de extrema importância para o projeto de tais equipamentos (Reina *et al.*, 2000). A determinação da velocidade de mínima fluidização é expressa, genericamente, a partir do ponto em que a pressão total iguala-se ao peso por unidade de área da coluna de sólidos. Esta afirmação deriva do balanço de forças resultantes de um leito fluidizado, calculado da seguinte maneira:

Força resultante = *peso – empuxo*

$$\begin{aligned}\Delta P \cdot A_c &= V_{Tp} (\rho_p - \rho_f) g \\ \Delta P &= \frac{V_{Tp} (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_f) g}{A_c} \\ \Delta P &= \frac{A_c \cdot L (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_f) g}{A_c} \\ \Delta P &= L \cdot [g \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_f)]\end{aligned}\tag{2.2}$$

Segundo as suposições de Wen e Yu (1966), no ponto de mínima fluidização os valores de queda de pressão da equação do balanço de forças, segundo a equação (2.2), são os

mesmos encontrados pela equação de Ergun (1952), representada pela equação (2.3) (Oka, 2004).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot u}{(d_p \cdot \phi)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f \cdot u^2}{(d_p \cdot \phi)} \quad (2.3)$$

Atualmente a equação de Ergun (2.3) é o modelo mais aceito para a previsão da queda de pressão em leitos fixos. É amplamente utilizada e não possui restrições ao número de Reynolds, tanto para leitos de partículas uniformes quanto não uniformes, e até mesmo para misturas de diversos tamanhos de partículas (Motta, 2009).

Sendo assim pode-se determinar a velocidade de mínima fluidização teórica, equação (2.4), igualando a perda de carga na mínima fluidização do balanço de forças, equação (2.2) com a perda de carga na equação de Ergun, equação (2.3) (Wen e Yu, 1966; Geldart, 1986; Oka, 2004):

$$150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot u_{mf}}{(d_p \cdot \phi)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f \cdot u_{mf}^2}{(d_p \cdot \phi)} = g \cdot (1-\varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_f) \quad (2.4)$$

Para aplicação das equações (2.2), (2.3) e (2.4) utiliza-se o parâmetro da porosidade (ε), expressa pela razão entre o volume de vazios total e o volume total do leito ocupado, definida pela equação (2.5):

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_p}{V_T} \quad (2.5)$$

Graficamente, utilizando o diagrama de perda de carga em função da velocidade do gás, esta definição é caracterizada como o ponto de interseção da linha de queda de pressão em leito fixo com a reta horizontal do peso por unidade de área da coluna (Kunii e Levenspiel, 1991; Clarke *et al.*, 2005). O método gráfico pode ser observado na Figura 2.6.

Os pontos experimentais de perda de carga verso velocidade ainda permitem determinar o ponto de mínima fluidização (u_{mf}) através da interseção da linha da queda de pressão em leito fixo com a linha obtida na fluidização completa (u_{fc}) ou perda de carga constante (Chiba *et al.*, 1979; Aznar *et al.*, 1992 a; Clarke *et al.*, 2005).

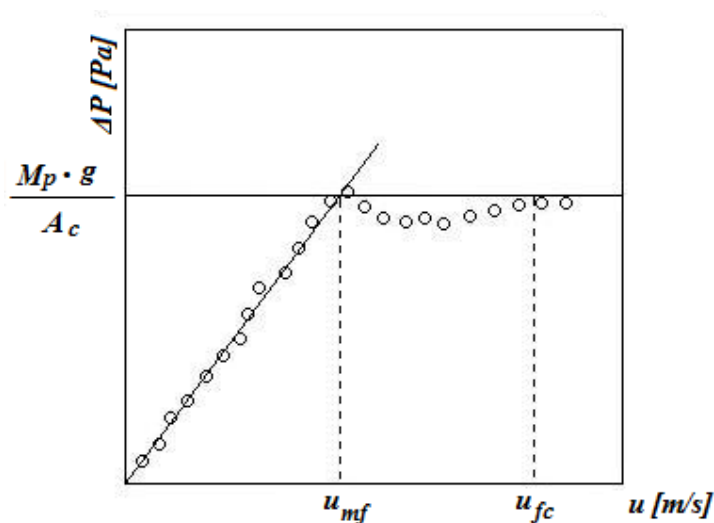


Figura 2. 6 – Perda de carga no leito na transição de leito fixo para leito fluidizado

O formato das curvas características de fluidização (Figura 2.7) fornece boas informações sobre a natureza e as características do leito fluidizado. Por essa razão, o conhecimento das medidas de queda de pressão através do leito é muito útil para os projetos de caldeiras de leito fluidizado, principalmente para o *start-up* da caldeira (Oka, 2004).

Se o leito é composto somente de material particulado monodisperso ideal, com forças interparticulares insignificantes, a linha de perda de carga através do leito sofre uma queda abrupta no momento em que a velocidade de mínima fluidização é atingida, representada pela curva (a) da Figura 2.7 (Oka, 2004).

A determinação da velocidade de mínima fluidização se torna um pouco mais complexa para materiais polidispersos, de formatos irregulares e superfície rugosa; com ou sem forças coesivas. Neste caso, o comportamento esperado é representado pela curva (b) da Figura 2.7, atingindo o comportamento de fluidização completa em (a) (Oka, 2004).

Durante a diminuição da velocidade do gás a partir de um sistema fluidizado completamente, ou seja, na defluidização, o comportamento esperado é representado pelas curvas (c) ou (d) da Figura 2.7 (Oka, 2004).

Se a fluidização de materiais polidispersos é realizada em velocidades muito superiores à da velocidade de mínima fluidização, a queda de pressão diminui devido à elutriação das partículas finas, e a curva representativa é a (e) da Figura 2.7 (Oka, 2004).

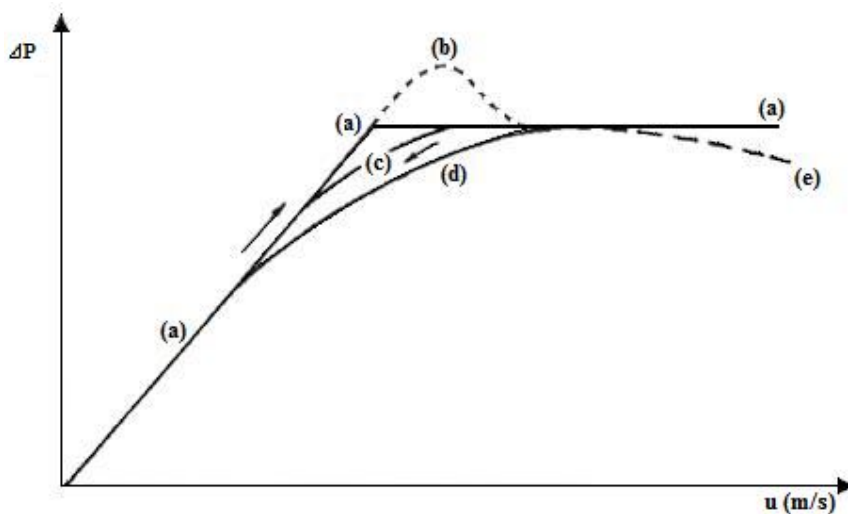


Figura 2.7 – Curvas características de fluidização
FONTE: Oka (2004)

A equação (2.4) é baseada na definição de mínima fluidização, por isso, é uma equação genérica e pode apresentar desvios grandes quando aplicada a sistemas com características muito peculiares. Numerosas equações para o cálculo da velocidade de mínima fluidização propostas pela literatura ilustram os esforços em obter equações mais precisas para determinados materiais, condições e tecnologias nas quais são utilizados leitos fluidizados. A Tabela 2.3 fornece algumas correlações listadas pela literatura (Grewal e Saxena, 1980, Gauthier *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 2002; Oka, 2004; Subramani *et al.*, 2007) para o cálculo da velocidade de mínima fluidização para partículas homogêneas numa ampla faixa de tamanhos e de número de Reynolds. A maioria das equações é simplificada baseando-se no número de Arquimedes (Ar) e de Reynolds na condição de mínima fluidização (Re_{mf}):

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \quad (2.6)$$

$$\text{Re}_{mf} = \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_f}{\mu} \quad (2.7)$$

Tabela 2. 3 – Modelos experimentais para a velocidade de mínima fluidização

Modelo	Autor	Equação
1	Todes <i>et al.</i> (1958)	$\text{Re}_{mf} = Ar / (1400 + 5,22 \cdot Ar^{0,5})$
2	Wen e Yu (1966)	$\text{Re}_{mf} = (33,7^2 + 0,0408 \cdot Ar)^{0,5} - 33,7$
3	Bourgeois e Grenier (1968)	$\text{Re}_{mf} = (25,46^2 + 0,03828 \cdot Ar)^{0,5} - 25,46$
4	Pillai e Raja Rao (1971)	$\text{Re}_{mf} = 0,000701 \cdot Ar$
5	Saxena e Vogel (1977)	$\text{Re}_{mf} = (25,28^2 + 0,0571 \cdot Ar)^{0,5} - 25,28$
6	Babu <i>et al.</i> (1978)	$\text{Re}_{mf} = (25,25^2 + 0,0651 \cdot Ar)^{0,5} - 25,25$
7	Richardson e Jeronimo (1979)	$\text{Re}_{mf} = (25,7^2 + 0,0365 \cdot Ar)^{0,5} - 25,7$
8	Doichev e Akhmakov (1979)	$\text{Re}_{mf} = 0,00108 \cdot Ar^{0,947}$
9	Thonglimp <i>et al.</i> (1984)	$\text{Re}_{mf} = (31,6^2 + 0,0425 \cdot Ar)^{0,5} - 31,6$
10	Lucas <i>et al.</i> (1986)	$\text{Re}_{mf} = (29,5^2 + 0,0357 \cdot Ar)^{0,5} - 29,5$
11	Tannous (1993)	$\text{Re}_{mf} = 0,03 \cdot Ar^{0,63}$
12	Barbosa <i>et al.</i> (1995)	$\text{Re}_{mf} = 0,0019 \cdot Ar^{0,87}$

Para sistemas polidispersos

A fluidização gás-sólido pode envolver misturas heterogêneas de dois ou mais sólidos, diferentes entre si em uma ou mais características essenciais (sistemas polidispersos). Quando há a necessidade de se trabalhar com sólidos multicomponentes, é preciso recorrer a estudos do comportamento específico da velocidade de mínima fluidização de misturas, para obter maneiras mais eficientes de manter um bom contato fluido – partícula (Formisani *et al.*, 2001).

Partículas de biomassa no seu estado puro, em geral, não fluidizam ou fluidizam de maneira precária devido às suas formas, tamanhos e densidades peculiares. Para aperfeiçoar a fluidização pode ser utilizado um segundo material sólido, o qual facilita a fluidização das partículas de biomassa e aumenta a eficiência do sistema. Normalmente utiliza-se um material inerte como areia, sílica, alumina ou calcita (Reina *et al.*, 2000; Rao e Bheemarasetti, 2001; Clarke *et al.*, 2005; Cui e Grace, 2007).

Várias equações para a determinação da u_{mf} de misturas são apresentadas na literatura. A maioria dessas equações é aplicada para sistemas de partículas de mesma densidade e tamanhos diferentes. Poucos autores apresentaram trabalhos utilizando misturas de partículas de densidades e tamanhos diferentes (Rao e Bheemarasetti, 2001).

Para sistemas polidispersos, cada fração de partículas ou cada componente sólido possui sua própria velocidade de mínima fluidização, mas muitas vezes, um valor aparente característico é definido para caracterizar todo o leito (Reina *et al.*, 2000).

As diferenças extremas na forma e na densidade entre a biomassa e a areia contribuem para gerar problemas únicos na fluidização de componentes binários (Aznar *et al.*, 1992 a). Como resultado, correlações convencionais para velocidade mínima fluidização, são improváveis de fornecer bons resultados para esses sistemas (Cui e Grace, 2007).

Muitos autores utilizam correlações baseadas em modelos de partículas binárias de mesma densidade e/ou tamanho para, a partir destes, desenvolver seus próprios modelos. Um dos modelos mais conhecidos e citados por vários autores (Wu e Baeyens, 1998; Reina *et al.*, 2000; Asif e Ibrahim, 2002) é o modelo empírico proposto por Otero e Corella (1971). É um modelo simples, baseia-se na média aritmética das velocidades de mínima fluidização dos compostos puros e na fração mássica destes. Representa a forma analítica da linha obtida na representação das curvas de perda de pressão em função da velocidade depois de adicionadas

as tangentes das duas espécies que constituem a mistura binária (Reina *et al.*, 2000). É definido por:

$$\overline{u_{mf}} = u_{mf1} \cdot x_1 + u_{mf2} \cdot x_2 \quad (2.8)$$

Reina *et al.* (2000) utilizaram a equação proposta por Otero e Corella (1971) para prever a fluidização de partículas de madeira de diversas origens, todas classificadas como partículas C de Geldart. A equação foi aplicada em sistemas de partículas puras, sem adição de inerte, porém, com várias faixas granulométricas levando em conta principalmente a influência do fator de forma ($0,24 < \phi < 0,69$) e a da porosidade ($0,47 < \varepsilon < 0,60$) do leito na u_{mf} . Primeiramente foi calculada uma média da porosidade do leito e da esfericidade de todas as partículas de madeira utilizadas. A partir disto, utilizando a equação de Ergun simplificada pelo número de Arquimedes e pelas constantes C_1 e C_2 , foram calculadas as u_{mf} para cada fração de tamanho individualmente:

$$\text{Re}_{mf} = \left[\left(42,857 \frac{C_2}{C_1} \right)^2 + \frac{Ar}{1,75 \cdot C_1} \right]^{0,5} - 42,857 \cdot \frac{C_2}{C_1}$$

$$C_1 = \frac{1}{\phi \cdot \varepsilon_{mf}^3} \quad C_2 = \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3}$$

Dessa maneira calculou-se a u_{mf} da mistura a partir de uma equação generalizada de Otero e Corella (1971) para n tipos de partículas:

$$\overline{u_{mf}} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot u_{mf_i} \quad (2.9)$$

Os valores teóricos obtidos foram comparados com os valores de u_{mf} encontrados experimentalmente pelo método gráfico. O desvio médio encontrado entre os valores foi de $\pm 6,22\%$ e foi atribuído à característica coesiva destes tipos de partículas e à formação de aglomerados no leito. Lucas *et al.* (1986) estudaram a influência da esfericidade das partículas

nas u_{mf} e concluíram que valores únicos generalizados de C_1 e C_2 para qualquer sistema podem ocultar grandes diferenças na esfericidade entre as partículas de um mesmo grupo e gerar um erro significativo na determinação da u_{mf} (Reina *et al.*, 2000).

Asif e Ibrahim (2002) estudaram a defluidização lenta de sistemas líquido-sólido, utilizando cinco binários sólidos diferentes. Os sólidos foram compostos de areia, esferas de vidro, resina de tereftalato de polietileno e plástico; e foi utilizada água à temperatura ambiente para a fluidização. Os binários variaram entre si no tamanho, densidade e forma (esférica e cilíndrica). A partir da equação de Otero e Corella (1971), Asif e Ibrahim (2002) propuseram uma modificação (equação 2.10) a fim de generalizar o modelo e não utilizar somente a média ponderada. Foi introduzido na equação um coeficiente p que, quando igualado a -1 representa a média harmônica e igualado a 1 representa a média ponderada, sendo que pode-se usar também valores intermediários entre estes para se obter boas predições.

$$\overline{u_{mf}}^p = \left[u_{mf1}^p \cdot x_1 + u_{mf2}^p (1 - x_1) \right] \quad (2.10)$$

Outra equação clássica muito citada na literatura (Chiba *et al.*, 1979; Wu e Baeyens, 1998; Rao e Bheemarasetti, 2001; Asif e Ibrahim, 2002; Clarke *et al.*, 2005; Zhong *et al.*, 2008) é a de Cheung *et al.* (1974). Da mesma maneira que a equação de Otero e Corella (1971), a equação de Cheung *et al.* (1974) também é uma equação empírica baseada na u_{mf} das partículas puras e nas frações mássicas destas na mistura:

$$\overline{u_{mf}} = u_{mf,s} \left(\frac{u_{mf,b}}{u_{mf,s}} \right)^{x_b^2} \quad (2.11)$$

Chiba *et al.* (1979) utilizaram o modelo de Cheung *et al.* (1974) e reportaram que tal modelo representou de maneira satisfatória seus dados experimentais de fluidização de sistemas binários mesmo para partículas de densidade diferentes. A única restrição deste modelo é na utilização para mais de dois tipos de partícula e para grandes diferenças entre o tamanho das partículas. Wu e Baeyens (1998) estudaram a fluidização gás-sólido de sistemas

binários de partículas de tamanhos diferentes e mesma densidade, pertencentes aos grupos A, B e D de Geldart, e obtiveram uma variação máxima de $\pm 10\%$ entre os valores calculados pelo modelo de Cheung *et al.* (1974) e os valores experimentais. Rao e Bheemarasetti (2001) utilizaram o mesmo modelo para calcular as u_{mf} da mistura de duas amostras de areias de mesma densidade e tamanhos diferentes, e encontraram valores subestimados com relação aos experimentais. Asif e Ibrahim (2002) obtiveram correlações tão boas utilizando o modelo de Cheung *et al.* (1974) quanto utilizando o modelo de Otero e Corella modificado para a constante p de valor -0,5. Clarke *et al.* (2005) não obtiveram bons resultados na tentativa de representar os dados experimentais da fluidização binária de serragem úmida e esferas de vidro utilizando o mesmo modelo. Zhong *et al.* (2008) estudaram a fluidização de alguns tipos de biomassa pura e juntamente com materiais inertes formando misturas binárias. As misturas variavam as relações de tamanho, densidade e frações mássicas de biomassa com o intuito de aplicar correlações de u_{mf} já existentes e desenvolver novas correlações. Um dos modelos aplicados para comparação com os resultados experimentais foi o de Cheung *et al.* (1974), o qual apresentou uma variação de $\pm 40\%$ com aqueles.

Aznar *et al.* (1992 a, b) estudaram a fluidização de vários tipos de biomassa (grãos em flocos de três diferentes tamanhos, pinos estreitos, serragem, pedaços de madeira de vários tamanhos e plantas trituradas) juntamente com um material inerte (minerais e sílica de diferentes tamanhos e densidades, carbonato e catalisadores comerciais de craqueamento catalítico). Foram discutidas as definições de velocidades de mínima e máxima fluidização, e aplicados métodos gráficos de determinação destas. Nenhuma das equações convencionais para determinação da u_{mf} de misturas binárias encontradas na literatura até a data foi adequada para fornecer boas predições. Os autores afirmam que as diferentes definições apresentadas por outros autores para a u_{mf} dificultam a comparação de modelos e a aplicação destes em outros sistemas. Recomendam ainda que seja realizada a determinação gráfica da u_{mf} para cada sistema a ser estudado evitando aplicar equações empíricas.

Rao e Bheemarasetti (2001) estudaram a fluidização da mistura biomassa e areia. As biomassas utilizadas foram serragem, casca de arroz e casca de amendoim; as quais foram fluidizadas com areias de duas faixas de densidade e de tamanho. Variaram-se as porcentagens mássicas de biomassa e para cada mistura foram coletados pontos experimentais da u_{mf} destes sistemas. Nenhuma das equações encontradas na literatura representou bem os dados experimentais. Os autores desenvolveram um modelo de predição da u_{mf} baseado modelo de predição de u_{mf} para sistemas puros de Kunii e Levenspiel (1969):

$$\overline{u_{mf}} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{1650 \mu}$$

O diâmetro e a densidade da partícula foram adaptados para um sistema de mistura pelas seguintes modificações:

$$\overline{u_{mf}} = \frac{d_{p,eff}^2 (\rho_{p,eff} - \rho_f) g}{1650 \mu} \quad (2.12)$$

$$d_{p,eff}^2 = k \left\{ d_{p1} \left[\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \cdot \left(\frac{d_{p2}}{d_{p1}} \right) \right]^{w_2/w_1} \right\}^2 \quad (2.13)$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{w_1 \rho_1 + w_2 \rho_2}{w_1 + w_2} \quad (2.14)$$

Para obter a constante k primeiramente calcula-se $\rho_{p,eff}$ pela equação (2.14) e a partir dos valores de $\rho_{p,eff}$ e dos valores experimentais de u_{mf} , determinados através dos métodos gráficos, calcula-se $d_{p,eff}$ pela equação (2.12). Assim, para cada fração da mistura é obtido um valor de k pela equação (2.13). Faz-se uma média dos valores de k encontrados e recalculam-se os valores de $d_{p,eff}$ para serem aplicados na equação (2.12) e calcularem-se os valores de u_{mf} das misturas.

O modelo representou bem os dados experimentais de Rao e Bheemarasetti (2001), principalmente para porcentagens de até 10% de biomassa e se mostrou satisfatório também quando utilizado pra predizer a u_{mf} de misturas de partículas de mesma densidade e tamanhos diferentes.

Observa-se que muitos trabalhos utilizam a u_{mf} determinada graficamente para comparação com modelos teóricos, porém, alguns autores afirmam que o este método é válido apenas para sistemas de densidade e tamanho uniformes (Reina *et al.*, 2000). Alternativamente a velocidade de mínima fluidização também pode ser determinada visualmente no ponto onde os dois componentes da mistura binária estão fluidizados (Noda *et al.*, 1986; Bilbao *et al.*, 1987).

É importante salientar que a precisão dos modelos que utilizam a u_{mf} das porções puras depende fortemente dos métodos que foram utilizados para calcular a u_{mf} das frações de cada tipo de partícula (Reina *et al.*, 2000).

2.2.2.3 Segregação

Quando um sistema de partículas diferentes entre si no tamanho, densidade ou forma sofre fluidização, um equilíbrio característico, de mistura ou segregação, é rapidamente atingido. A fluidização gera uma distribuição dos componentes da mistura ao longo da altura do leito e esta distribuição depende tanto das propriedades das partículas como das condições gerais do processo (Formisani *et al.*, 2001).

Apesar do fenômeno da segregação ser amplamente descrito, seu mecanismo ainda não é de todo compreendido e por isso os poucos modelos de predição de dados disponíveis são essencialmente empíricos. A complexidade do problema é atribuída ao grande número de fatores que afetam a mistura, além disso, não é claro como e com que intensidade a teoria de fluidização de leitos monodispersos podem ser adaptados para sistemas multicomponentes (Formisani *et al.*, 2001).

Um dos problemas encontrados é a dificuldade em se determinar a influência da segregação na determinação da velocidade de mínima fluidização, devido ao fato de que o início da fluidização é, muitas vezes, acompanhado do fenômeno da segregação, o que pode afetar o comportamento do sistema em geral (Formisani *et al.*, 2001).

De um extremo ao outro do leito o sistema pode ser formado por uma única fase bem misturada; por distintas camadas, cada uma de um tipo de sólido; ou por uma distribuição intermediária dos componentes ao longo da altura do leito (Formisani *et al.*, 2001). Chiba *et al.* (1979) definem três estados de mistura de sistemas binários em leitos fluidizados: completamente misturado, completamente segregado e parcialmente misturado. Num sistema completamente segregado, o topo e o fundo de leitos fluidizados consistem em partículas *flotsam* e *jetsam* puras, respectivamente. O componente com maior densidade, designado *jetsam*, tende a submergir, e o componente mais leve, designado *flotsam*, tende a emergir. No caso de não existir diferença na densidade a partícula de maior tamanho é designada a *jetsam*. Num leito fluidizado completamente misturado não há variação na concentração dos componentes *flotsam* e *jetsam* em toda a extensão do leito. Em sistemas parcialmente

misturados ocorre uma alta concentração de *jetsam* no fundo do leito e de *flotsam* no topo, enquanto que na extensão do leito as partículas podem estar completamente misturadas (Clarke *et al.*, 2005).

Chiba *et al.* (1979) demonstraram que a u_{mf} é função das porções segregadas e misturadas de partículas do leito. Um sistema binário completamente misturado começará a fluidizar numa única velocidade de mínima fluidização, entre as velocidades de mínima fluidização dos dois componentes puros. Em um sistema binário completamente segregado, a fluidização começa perto da velocidade do componente *flotsam*, mas o leito não fluidiza completamente até que a velocidade do gás se aproxime da velocidade de mínima fluidização do componente *jetsam*. Um leito parcialmente misturado terá um comportamento intermediário entre esses dois extremos (Clarke *et al.*, 2005).

Em sistemas que tendem a segregar, o modo como se executa o experimento tem grande influência na determinação da u_{mf} . Qualquer estado de mistura inicial origina uma curva de perda de carga em função da velocidade característica. Com isso, pode-se dizer que, em experimentos conduzidos de maneira a se aumentar a vazão de gás até que ocorra a fluidização, um sistema binário exibe tantos valores de mínima fluidização quantos o perfil de composição inicial do leito fixo permite. Então o mesmo sistema poderá ter várias u_{mf} mesmo que todas as curvas convirjam para o mesmo ponto de velocidade de fluidização completa. Porém, quando a determinação da u_{mf} é feita a partir da defluidização, pela diminuição da vazão de gás, partindo-se da mistura homogênea, ou seja, do estado de fluidização completa, qualquer sistema de mesma composição volta ao estado de leito fixo através de um percurso repetível de queda de pressão caracterizando um mesmo ponto de mínima fluidização. Estas características são válidas somente dentro de uma faixa da relação mínima de altura /diâmetro do leito ($1 < L/D < 2$), pois para leitos muito rasos não se pode fazer essa afirmação (Formisani *et al.*, 2001).

Um dos estudos na área da segregação, citado por diversos autores (Wu e Baeyens, 1998; Gauthier *et al.*, 1999; Reina *et al.*, 2000; Clarke *et al.*, 2005) é o trabalho de Chiba *et al.* (1979), que estudaram o efeito da segregação na determinação da u_{mf} de misturas binárias de partículas esféricas e irregulares de densidades e tamanhos diferentes. Fundamentado na teoria da fluidização, em estudos anteriores e nos dados experimentais obtidos, propuseram um modelo baseado na densidade, no tamanho e nas velocidades de mínima fluidização dos compostos puros para diferentes estados de mistura do leito:

- Para leitos misturados:

$$\overline{u_{mf}} = u_f \frac{\overline{\rho}}{\rho_{fl}} \left(\frac{\overline{d}}{d_{fl}} \right)^2 \quad (2.15)$$

$$\overline{\rho} = V_{fl} \rho_{fl} + \rho_j (1 - V_{fl}) \quad (2.16)$$

$$\overline{d} = \left[N_{fl} d_{fl}^3 + d_j^3 (1 - N_{fl}) \right]^{1/3} \quad (2.17)$$

$$N_{fl} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{V_{fl}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{d_{fl}}{d_j} \right)^3} \quad (2.18)$$

- Para leitos segregados:

$$\overline{u_{mf}} = \frac{u_{fl}}{x_f \left(1 - \frac{u_{fl}}{u_j} \right) + \left(\frac{u_{fl}}{u_j} \right)} \quad (2.19)$$

Clarke *et al.* (2005) não obtiveram bons resultados na tentativa de representar os dados experimentais da fluidização binária de serragem úmida e esferas de vidro utilizando o modelo de Chiba *et al.* (1979).

Formisani *et al.* (2001) apresentam um estudo experimental do comportamento da fluidização de misturas binárias de esferas de vidro de mesma densidade e tamanhos diferentes a várias composições médias. O estudo é direcionado para o efeito da segregação das partículas e para a influência deste na velocidade de mínima fluidização. Resultados dos estudos de mostram que o comportamento da fluidização de sólidos binários de mesma densidade é fortemente influenciado pela composição do leito fixo inicial, a qual é associada à variação axial do diâmetro médio das partículas e à porosidade do leito. Baseado nessa constatação, Formisani *et al.* (2001) propuseram um modelo para a velocidade de mínima fluidização reescrevendo a clássica equação de Carman-Kozeny numa forma modificada a qual leva em consideração a variação axial da porosidade e do diâmetro médio da partícula.

Formisani *et al.* (2001) afirmam que a interpretação do comportamento da fluidização de misturas binárias de partículas sólidas de diferentes tamanhos dificilmente é concluída numa base puramente empírica e que as velocidades de mínima fluidização dos componentes puros são parâmetros que não necessariamente têm relação significativa com o comportamento da fluidização de suas misturas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão apresentados os materiais envolvidos nos experimentos, bem como uma descrição detalhada dos equipamentos e procedimentos adotados.

3.1 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Os testes experimentais foram realizados em um equipamento que consiste basicamente de três partes principais: um compressor de ar, um permeâmetro onde é formado o leito para o ensaio, e um duto interligando essas duas partes. O equipamento é utilizado para medir a variação de pressão que o fluido sofre ao atravessar o leito. Para cada leito estudado são levantadas curvas de diferencial de pressão em relação à velocidade do fluido pela variação desta no decorrer dos testes.

A Figura 3.1 mostra um desenho esquemático do equipamento utilizado nos testes de medição de queda de pressão. O ar é impulsionado por um soprador (1) com potência de 1,5 hp por um trecho horizontal reto de duto de aço-carbono com 0,5 m de comprimento e diâmetro interno de 50 mm, no qual se encontra uma válvula gaveta (2) utilizada para controle da vazão de ar. Após outro duto reto vertical (3) de PVC de 2 m de comprimento e 52 mm de diâmetro interno, encontram-se o Venturi (4) e um termômetro (5) usados para a medição da vazão e da temperatura do ar. Um duto flexível (6) faz a interligação do Venturi com o distribuidor de ar primário (7) onde foi adaptada uma camada de telas metálicas com abertura de 4,6 mm, seguida de 0,9 m de cilindro vazio (8), ambos para distribuir e estabilizar ao máximo o fluxo de ar e evitar caminhos preferenciais de fluxo no leito. Na base do permeâmetro (10) propriamente dito foi adaptado um distribuidor (9) tanto para sustentação do leito como para distribuição do ar. Foram utilizados dois distribuidores diferentes para cada tipo de leito estudado. Num primeiro momento empregou-se uma tela metálica com furos de 2 mm; e num segundo momento, na utilização do equipamento para partículas menores, empregou-se um distribuidor formado por duas telas metálicas de aberturas diferentes (2 e 0,5 mm) mais duas telas de tecido de *nylon*. As telas que formam o distribuidor

podem ser visualizadas na Figura 3.2. Após a passagem pelo leito, o ar é expulso para a atmosfera (13).

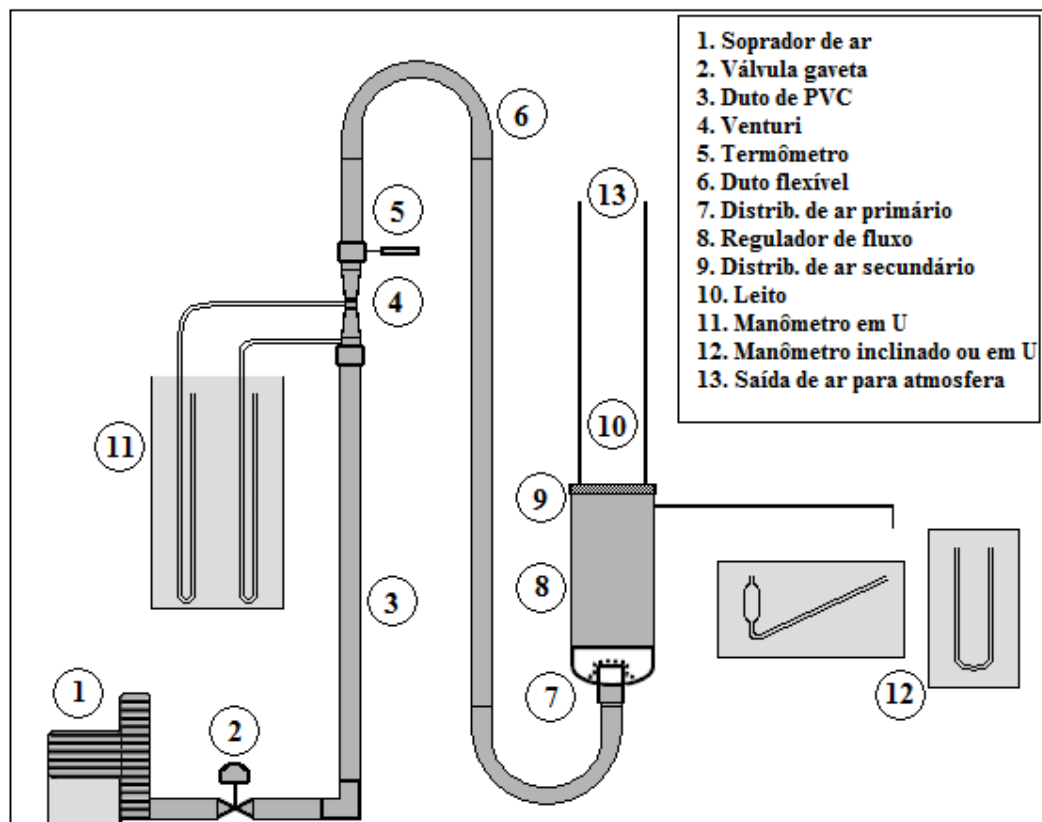


Figura 3. 1 – Equipamento para medição de queda de pressão
FONTE: Motta (2009) (Adaptado pelo autor)

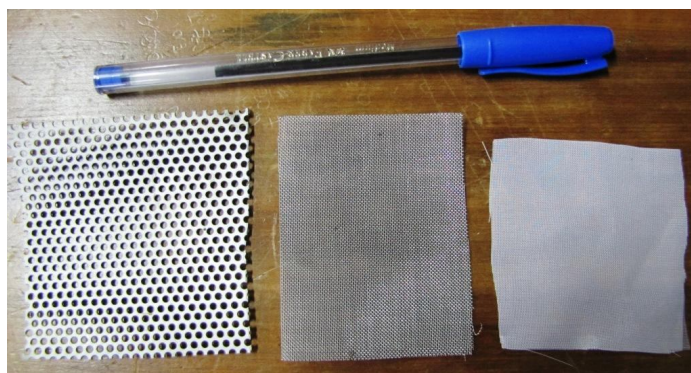


Figura 3. 2 – Telas que compõem os distribuidores (2 mm; 0,5 mm e nylon, respectivamente)

Para a medição da queda de pressão no Venturi foram utilizados dois manômetros do tipo tubo em U vertical (11) e para a medição do diferencial de pressão no leito foram

utilizados um manômetro do tipo tubo em U vertical e um do tipo tubo inclinado, com inclinação de 12° em relação ao plano horizontal, dependendo da faixa de pressões (12). Em ambos os casos o líquido utilizado foi água. A medição da pressão estática na linha se localiza no trecho reto do Venturi, antes do afunilamento, e é conectada a um dos manômetros do tipo tubo em U vertical (11).

O cilindro vertical onde se encontra o leito a ser estudado consiste, abaixo do distribuidor (9), em um tubo de PVC com diâmetro interno de 203 mm e acima do distribuidor secundário em um cilindro de vidro de 153 mm de diâmetro interno e área transversal de 0,0184 m². O leito é carregado pela extremidade superior aberta e descarregado através do desencaixe da parte de baixo do cilindro de vidro.

O Venturi utilizado para medição da vazão tem diâmetro de interno de 50 mm e diâmetro da garganta de 26,25 mm, confeccionado conforme a norma ISO 5167-4 (ISO, 2003).

A medida de pressão antes do leito é realizada através de um orifício logo abaixo da tela de suporte do mesmo, confeccionado de forma perpendicular ao eixo da coluna, com extremidade completamente livre de rebarbas e imperfeições. Neste orifício é adaptado um tubo metálico, rente à parede da coluna, que faz a conexão com a mangueira de transmissão do sinal até o manômetro tubo em U ou inclinado.

3.2 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

O material utilizado nos testes foi fornecido pela empresa Klabin S.A., e é o material utilizado no processo de caldeiras de combustão de leito fluidizado. O material é formado por quatro tipos de areia, material inerte utilizado no processo, e dois tipos de biomassa. Os materiais foram estudados individualmente e em mistura e sua caracterização é descrita a seguir.

3.2.1 Amostras de inertes

Foram utilizadas amostras de quatro tipos de areia. Dois tipos são amostras de areias novas, utilizadas para reposição no processo, e dois tipos são amostras do material interno da

caldeira, ou seja, são formados pela areia e pela biomassa em processo. Cada amostra é utilizada em uma situação específica no processo e, por isso, serão avaliadas separadamente.

As amostras A1 e B1 são as areias novas e em processo da caldeira 01 (caldeira de leito fluidizado borbulhante) respectivamente, e as amostras A2 e B2 são as areias novas e em processo da caldeira 02 (caldeira de leito fluidizado circulante).

De início determinou-se experimentalmente a massa específica de cada amostra de areia. Pesou-se uma massa conhecida de areia, colocando-a em uma proveta de 100 mL e completando com 50 mL de água à temperatura conhecida utilizando uma pipeta volumétrica. Agitou-se bem a areia com a água para liberar qualquer bolha de ar formada e mediu-se o volume final. Utilizando as diferenças de massa e volume final calculou-se a densidade específica de cada amostra. Foram realizados também testes para determinar o teor de umidade das amostras. Para isso, pesou-se uma massa conhecida da amostra que foi deixada 24 horas em uma estufa a 100°C. Os valores encontrados, na ordem de 0,03%, foram desprezados. Todos os testes foram feitos em triplicata e os resultados encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1 – Massa específica das amostras utilizadas

<i>Amostra</i>	<i>Densidade (g/cm³)</i>
Areia A1	2,585 ± 0,032
Areia A2	2,512 ± 0,024
Areia B1	2,576 ± 0,027
Areia B2	2,589 ± 0,007

Em seguida fez-se o peneiramento das partículas através de uma série de telas com aberturas padronizadas seguindo a norma ASTM E-437, conforme Tabela 3.2.

Para determinação da análise granulométrica pesou-se uma massa conhecida da amostra e colocou-se no peneirador por dez minutos. Depois de passado esse tempo pesou-se a massa que ficou retida em cada peneira. Através das frações mássicas (x_j) retidas em cada peneira; e pelo diâmetro médio (D_p) entre a peneira em que a partícula ficou retida e a peneira com abertura imediatamente maior, calculou-se o diâmetro médio da partícula através da equação citada na Tabela 2.1 para diâmetro de peneira.

Tabela 3. 2 – Peneiras padrão utilizadas

Designação da peneira		Abertura nominal (in)
Padrão (mm)	Alternativa (in)	
3,350	No. 6	0,132
1,700	No. 12	0,0661
0,850	No. 20	0,0331
0,600	No. 30	0,0234
0,425	No. 40	0,0165
0,300	No. 50	0,0117
0,212	No. 70	0,0083
0,150	No. 100	0,0059
0,106	No. 140	0,0041
0,075	No. 200	0,0029
0,053	No. 270	0,0021

FONTE: ASTM (1997) (Adaptado pelo autor)

Os resultados das análises granulométricas podem ser observados na Figura 3.3 e na Tabela 3.3.

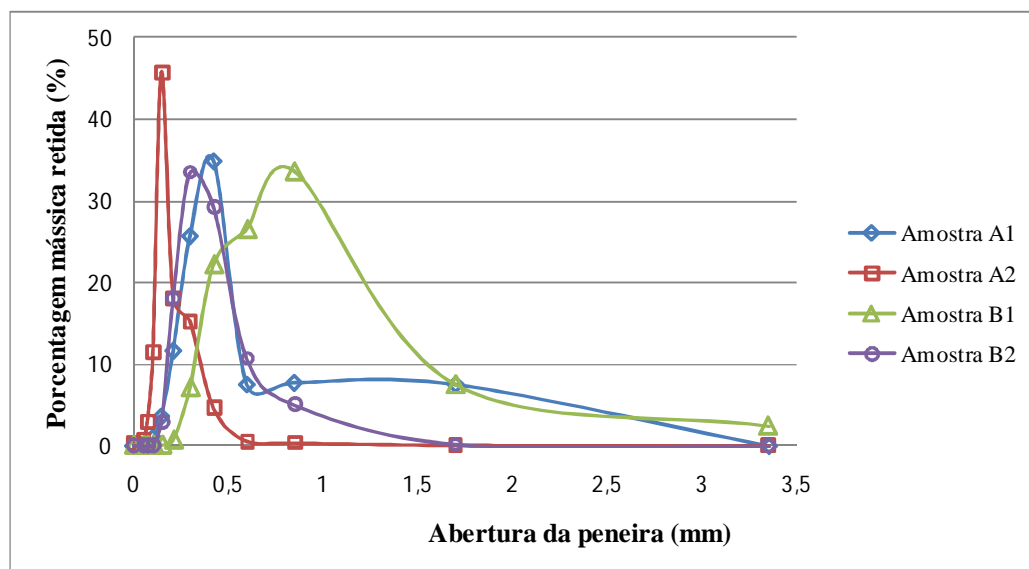


Figura 3. 3 – Análise granulométrica das amostras

Tabela 3. 3 – Faixa de diâmetros e diâmetros médios das amostras

<i>Amostra</i>	<i>Faixa de diâmetros (mm)</i>	<i>d_p (mm)</i>
Areia A1	0,256 – 1,275	0,422
Areia A2	0,128 – 0,725	0,193
Areia B1	0,363 – 1,275	0,744
Areia B2	0,181 – 1,275	0,387

A esfericidade das amostras de areia foi determinada através de permeamtria com água a baixas velocidades. Dados de perda de carga em função da velocidade foram ajustados pela equação de Ergun (2.3), sendo a esfericidade efetiva o parâmetro de ajuste. O valor médio encontrado de 0,90 foi adotado nesse trabalho.

As amostras podem ser visualizadas na Figura 3.4:

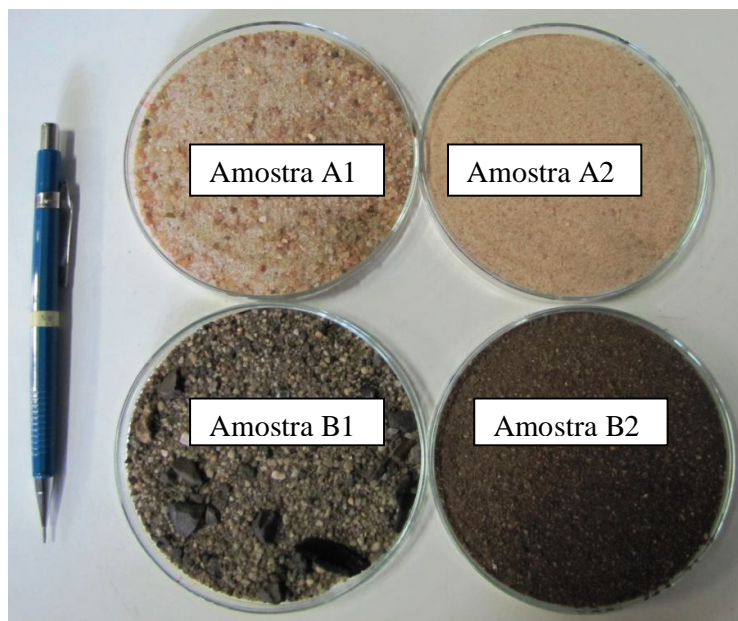


Figura 3. 4 – Exemplos das amostras de areia utilizadas

3.2.2 Amostras de biomassa

Foram utilizados dois tipos de biomassa, que diferenciam entre si na origem. A amostra C1 provém do solo de onde são cortadas as árvores que vão para o processo de produção de papel e é formada por restos de cascas de árvore, pedaços de madeira de todos os

tamanhos e serragem. A amostra C2 provém dos picadores da madeira da fábrica, são os resíduos que ficam depois do corte e é formada por cascas, cavacos e pó de madeira. Nenhuma das amostras apresenta um perfil de tamanho e forma padrão.

Foram determinadas experimentalmente as massas específicas e a umidade das amostras de biomassa, da mesma maneira que foram realizadas para as amostras de areia, com a diferença de terem sido utilizadas provetas de 250 mL. Também foram determinadas as massas específicas das amostras de biomassa secas. Todos os testes foram feitos em triplicata e os resultados encontram-se na Tabela 3.4.

Tabela 3. 4 – Massa específica e valores de umidade das amostras utilizadas

<i>Amostra</i>	<i>Densidade (g/cm³)</i>	<i>Umidade (%)</i>
Biomassa C1	$0,937 \pm 0,017$	51
Biomassa C2	$0,905 \pm 0,043$	40
Biomassa C1 seca	$0,596 \pm 0,038$	-
Biomassa C2 seca	$0,540 \pm 0,017$	-

Pelo fato de não apresentarem um padrão de forma e tamanho, os diâmetros e as esfericidades representativos das amostras de biomassa foram determinados experimentalmente de maneira indireta utilizando a equação de Ergun (2.3) (diâmetro hidrodinâmico). Os resultados são apresentados na análise de resultados.

As amostras podem ser visualizadas na Figura 3.5:



Figura 3. 5 – Exemplos das amostras de biomassa utilizadas

3.2.3 Amostras de misturas

Além das amostras de areias e de biomassas puras, foi estudado também o comportamento da fluidização das misturas desses componentes. A literatura sugere que seja utilizada até 10 – 15% em massa de biomassa, porém, devido à natureza do sistema, para valores mais altos que 5% a fluidização não foi satisfatória.

Primeiro pesava-se uma massa conhecida de areia, a qual conferisse uma altura de leito adequada. Baseado na massa de areia calculou-se o valor de biomassa referente à porcentagem desejada. Os valores utilizados foram 0,5%; 1,0%; 1,5%; 2,6% e 5,3% em massa de biomassa. Os testes começaram do menor valor e ao final de cada teste adicionava-se a biomassa referente à próxima porcentagem, mantendo a massa inicial de areia.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos consistem em três partes. Primeiramente foram determinadas as curvas de variação de pressão no leito em função da velocidade do ar para as amostras de biomassa pura em leito fixo. Em seguida foi realizada a fluidização das amostras de areia pura para obtenção do comportamento individual destas e por fim a fluidização de misturas de biomassa e areia. As três partes têm em comum o procedimento experimental da tomada dos pontos de variação de pressão no leito em função da velocidade do ar, e diferem entre si no manômetro para verificação da pressão antes do leito e no tipo de distribuidor utilizado.

Inicialmente pesou-se uma quantidade determinada de material e carregou-se o leito de maneira a se obter um arranjo aleatório das partículas, adicionando o material pela abertura superior em pequenas porções. Para as misturas de biomassa e areia, o material foi colocado alternando-se camadas de areia e biomassa.

Para biomassa pura e para misturas de areia e biomassa, a irregularidade da forma das partículas de biomassa dificulta a obtenção de uma superfície plana. Em decorrência disso, após o carregamento foram tomadas medidas de altura do leito em vários pontos a fim de se obter um valor médio. Nos testes em que foram utilizadas as misturas dos componentes puros, antes de começar a tomar as medidas, ligava-se o soprador e abria-se a válvula na vazão máxima de ar para que o leito fosse misturado por agitação violenta. Essa medida foi

tomada para que o arranjo do leito não seguisse uma configuração padrão tendenciosa. Neste caso só depois de misturado é que eram tomadas as medidas de altura do leito.

Com o duto flexível desconectado do distribuidor de ar primário, acionava-se o soprador durante aproximadamente 10 minutos no intuito de estabilizar a temperatura do ar na saída do soprador. Testes de vazamento em todo o sistema eram realizados antes do carregamento da coluna, com o sistema todo conectado e o soprador de ar acionado; e durante o experimento verificava-se o possível aparecimento de vazamentos. Depois de estabilizada a temperatura dava-se início ao teste.

Para cada teste foram anotados os valores da pressão manométrica na entrada e na garganta do Venturi, e na entrada do leito de biomassa. Antes de cada medição de velocidade fez-se uma correção do menisco dos manômetros através de pequenas batidas no tubo já que, devido à tensão superficial do líquido do manômetro, foi verificada a formação de histerese. Para o procedimento experimental com as amostras de biomassa foi utilizado o manômetro inclinado, e para as amostras de areia e de misturas de areia e biomassa, foi utilizado o manômetro em U. O cálculo da velocidade do ar que atravessa o leito através da medição de vazão de ar pelo Venturi é detalhado no item seguinte.

A medida da perda de carga do sistema e a determinação da velocidade de mínima fluidização foi realizada pela variação na vazão que ora era medida pelo decréscimo e ora pelo acréscimo na velocidade do ar. Para cada material utilizado esse procedimento interferiu de uma maneira diferente e será avaliado nos resultados.

Para verificação da repetitividade dos testes e avaliação dos erros experimentais, foram realizados mais de um teste para o mesmo material com alturas do leito próximas. O resultado é analisado posteriormente nos resultados.

Terminada a sequência de tomada dos pontos, desliga-se o soprador e descarrega-se o sistema. Para isso, o leito é desconectado da coluna e esvaziado pela parte superior. Pesa-se a massa retirada para identificação de eventuais perdas de partículas do sistema, pela abertura para a atmosfera pela passagem do ar e pela passagem de partículas através do distribuidor durante o carregamento do leito. É feita a limpeza do leito e do restante do sistema para remoção de qualquer partícula residual, montando-se o sistema novamente tomando o cuidado com o devido alinhamento de todas as partes, e faz-se a vedação do leito.

A perda de carga da coluna vazia para os dois distribuidores foi determinada experimentalmente e subtraída dos valores da perda de carga total do sistema. Como são usados dois distribuidores diferentes, para cada situação foi considerada a perda de carga respectiva através das seguintes relações:

$$\Delta P_{coluna} = 0,1965 \cdot u \quad (2.20)$$

$$\Delta P_{coluna} = 0,3103 \cdot u^2 + 0,6176 \cdot u \quad (2.21)$$

Foram tomadas medidas de temperatura na saída do leito em todos os testes e a temperatura encontrada foi a mesma que a temperatura ambiente em todos os casos, de tal forma que a variação da viscosidade do ar não teve influência significativa nos cálculos de perda de carga.

3.4 CÁLCULO DA VELOCIDADE DO AR

O princípio do método de medição baseia-se na instalação de um tubo de Venturi em um duto no qual um fluido passa por ele completamente cheio. Em um tubo de Venturi existe uma diferença de pressão estática, entre a seção de entrada e a seção da garganta do dispositivo (A_{GV}). O fluxo em massa pode ser determinado pela seguinte fórmula (ISO, 2003):

$$q_m = C \cdot Y \cdot A_{GV} \sqrt{\frac{2\rho_f (P_1 - P_2)}{1 - \beta^4}} \quad (3.21)$$

Da mesma forma, o valor do fluxo em volume pode ser calculado por (ISO, 2003):

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_f} \quad (3.22)$$

O coeficiente de compressibilidade (Y) foi calculado através da seguinte equação (DELMÉE; 1982):

$$Y = \left\{ \frac{P_1}{P_1 - P_2} \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\kappa}} \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right] \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\kappa} \right\}^{1/2} \quad (3.23)$$

O valor do coeficiente de descarga (C) utilizado nos cálculos foi de 0,98 (DELMÉE; 1982).

Foi considerada a influência da pressão e temperatura dos testes na correção da densidade do ar, sendo este considerado como gás ideal. A viscosidade foi corrigida pela seguinte equação (FOX; MCDONALD, 2001):

$$\mu = \frac{1,458 \times 10^{-6} T^{0,5}}{1 + \frac{110,4}{T}} \quad (3.24)$$

O valor da vazão mássica foi calculado através da equação (3.21) utilizando-se a densidade do ar (ρ) calculada à temperatura medida na entrada do Venturi. A vazão mássica foi convertida em vazão volumétrica com o uso da equação (3.22) considerando-se a densidade do ar à temperatura ambiente, de modo a corrigir a redução na temperatura da entrada do Venturi até o leito. Conhecendo-se a vazão volumétrica de ar, a velocidade superficial (u) é calculada pela seguinte equação (Motta, 2009):

$$u = \frac{q_v}{A_c} \quad (3.25)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente. Em resumo, serão reportados os dados experimentais relativos aos ensaios de perda de carga em relação à velocidade do ar para determinação do diâmetro característico das amostras de biomassa e das velocidades de mínima fluidização das amostras de biomassa, de areia e das misturas de areia e biomassa.

4.1 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO CARACTERÍSTICO DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA

Como as partículas de biomassa não possuem tamanho e forma padronizados, o objetivo da primeira parte experimental foi determinar indiretamente o diâmetro da partícula multiplicado pela sua esfericidade, ou diâmetro característico (d_p, ϕ). A maneira encontrada para essa determinação foi obter as curvas de variação da pressão no leito em função da velocidade do ar, através de um leito fixo de biomassa úmida, e ajustá-las utilizando a equação de Ergun, equação (2.3).

Inicialmente foram realizados seis testes com cada amostra de biomassa, separadamente, variando-se a altura do leito (L), os quais resultaram em 388 pontos experimentais. Cada teste foi realizado com uma porção diferente da amostra global de cada tipo. Para comparação do comportamento da perda de carga no leito (ΔP) entre os testes, os dados de $\Delta P/L$ foram plotados em função da velocidade do ar, e podem ser observados nas Figuras 4.1 e 4.2:

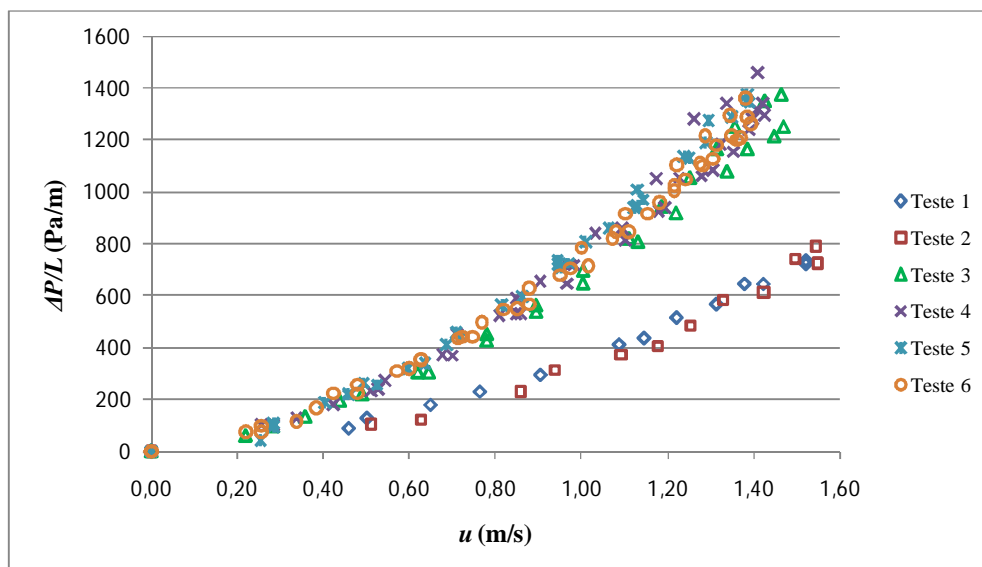


Figura 4. 1 – Pontos experimentais de perda de carga no leito para a amostra C1

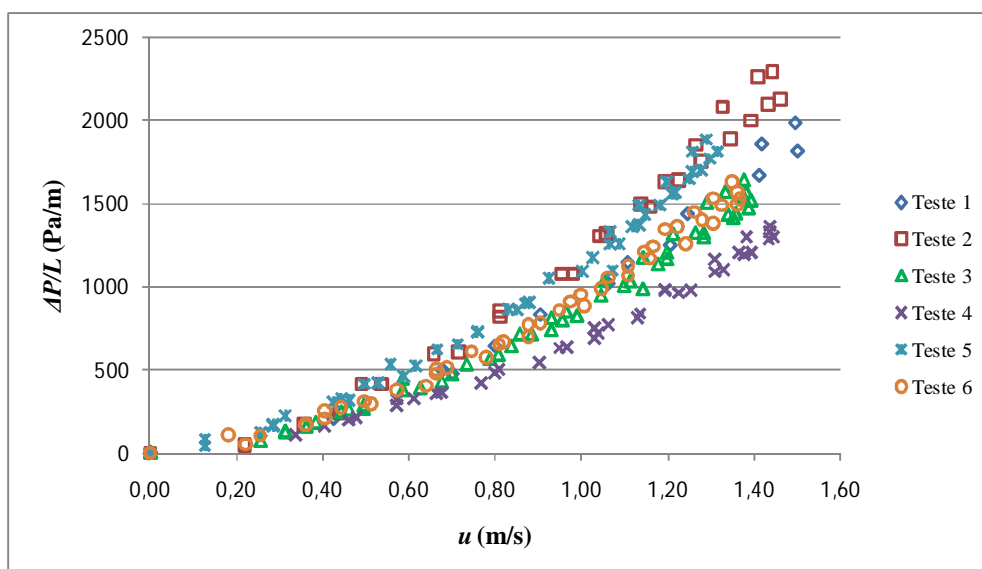


Figura 4. 2 – Pontos experimentais de perda de carga no leito para a amostra C2

Os valores das alturas de leito utilizadas para cada teste de cada amostra podem ser visualizados na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 – Alturas de leito (L) dos testes realizados para as amostras C1 e C2

<i>Teste</i>	<i>Altura do leito (m)</i>	
	<i>Amostra C1</i>	<i>Amostra C2</i>
1	0,16	0,10
2	0,13	0,13
3	0,17	0,32
4	0,34	0,31
5	0,36	0,35
6	0,40	0,36

O critério empregado para avaliação dos dados experimentais baseou-se na linha de tendência representativa dos dados experimentais. As medidas que tiveram uma variação maior de $\pm 30\%$ em relação à essa linha de tendência foram descartadas. Esta avaliação pode ser visualizada nas Figuras 4.3 e 4.4. Por esse critério os testes 1 e 2 da amostra C1 foram desconsiderados para cálculos posteriores. O comportamento dos dados descartados foi relacionado a erros sistemáticos eliminados nos testes seguintes a eles. Para a amostra C2 foram considerados todos os testes realizados por permanecerem dentro dos limites do critério estabelecido.

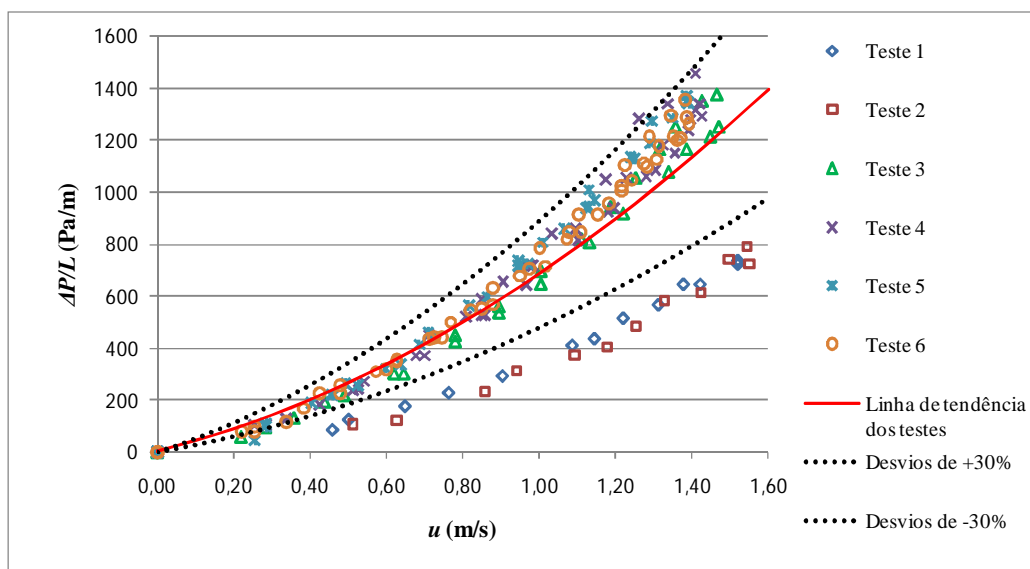


Figura 4. 3 – Critérios de avaliação aplicados as dados da amostra C1

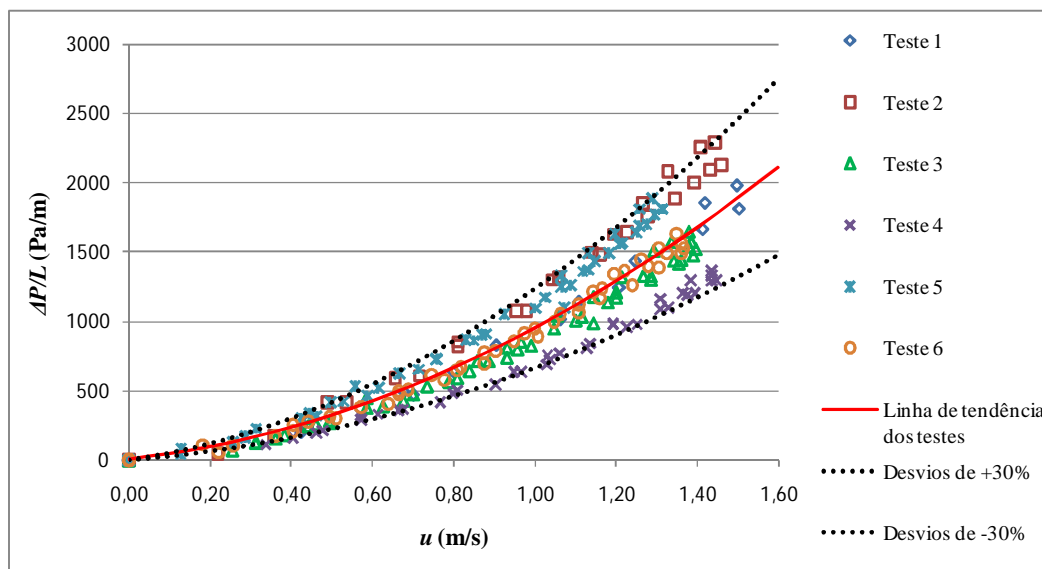


Figura 4. 4 – Critérios de avaliação aplicados aos dados da amostra C2

Em cada teste, de cada amostra de biomassa, foram obtidos valores de porosidade do leito, densidade e viscosidade do ar. Para aplicação da equação de Ergun foi calculado um valor médio para cada um desses parâmetros, utilizando os dados de todos os testes. Para o ajuste do valor de $d_p \cdot \emptyset$ foi utilizada a ferramenta “Solver” do MSExcel para minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os valores de $\Delta P/L$ experimentais e os calculados. Os valores médios dos parâmetros utilizados e os valores de $d_p \cdot \emptyset$ ajustados estão sintetizados na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2 – Parâmetros médios utilizados e diâmetros característicos calculados

<i>Parâmetro</i>	<i>Amostra C1</i>	<i>Amostra C2</i>
Porosidade do leito	0,81	0,74
Densidade do ar (kg/m ³)	1,07	1,07
Viscosidade do ar (Pa.s)	1,85E-5	1,85E-5
$d_p \cdot \emptyset$ ajustado (mm)	1,16	1,60

Os valores de $\Delta P/L$ experimentais e modelo ajustado com o diâmetro característico encontrado podem ser visualizados nas Figuras 4.5 e 4.6:

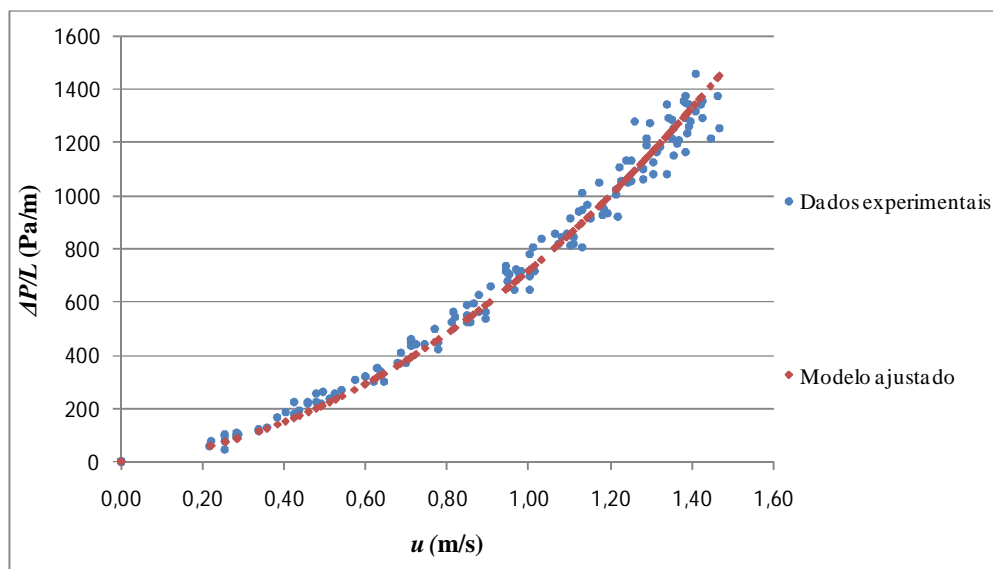


Figura 4. 5 – Pontos experimentais e modelo ajustado para a amostra C1

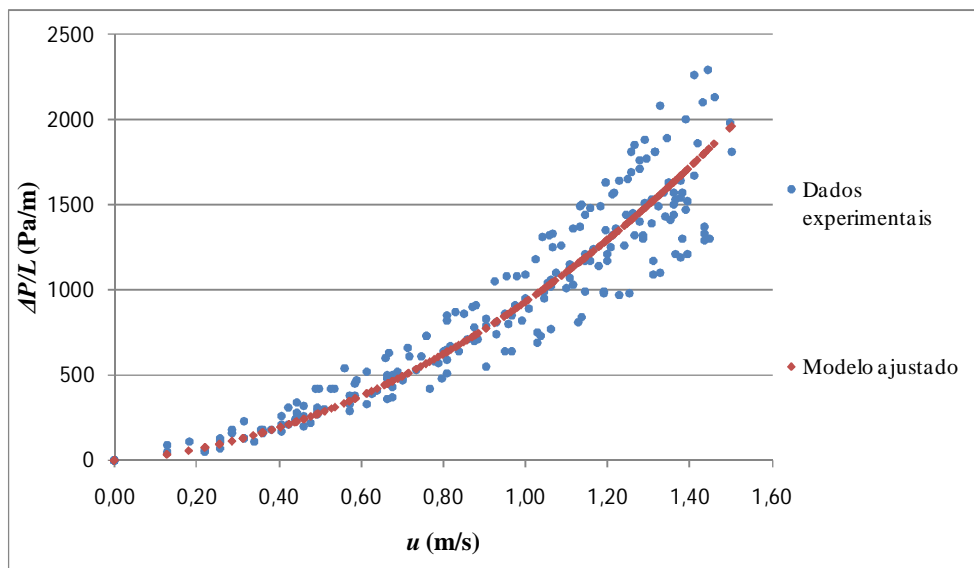


Figura 4. 6 – Pontos experimentais e modelo ajustado para a amostra C2

Comparando-se as duas amostras de biomassa nota-se que as duas apresentaram comportamentos semelhantes, porém, os testes para a amostra C2 obtiveram valores mais elevados para a perda de carga no leito, nas mesmas velocidades do ar. Tal característica foi relacionada ao fato de a porosidade do leito de biomassa da amostra C2 ser menor que para a amostra C1.

Pelas Figuras 4.5 e 4.6 pode-se notar que o modelo de Ergun representa bem os dados experimentais, sendo possível afirmar que este representou bem os dados experimentais

das duas amostras utilizando os valores do diâmetro característico d_p, \emptyset ajustado. É importante ressaltar que o valor de d_p, \emptyset encontrado para cada amostra é um valor médio representativo para a todas as amostras, e que estas são formadas por partículas de várias faixas de tamanhos.

4.2 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA

Após a determinação dos diâmetros característicos das amostras de biomassa foi possível calcular a velocidade de mínima fluidização das mesmas. Como a fluidização da biomassa pura é muito difícil de ser atingida sem a adição de um material inerte (Reina *et al.*, 2000; Rao e Bheemarasetti, 2001; Clarke *et al.*, 2005; Cui e Grace, 2007), as u_{mf} das amostras de biomassa puras foram determinadas teoricamente utilizando-se o princípio básico do balanço de forças da teoria da mínima fluidização representada pela equação (2.4). Utilizando parâmetros da Tabela 4.1 aplicou-se a equação do balanço de forças (2.4) para os dados de cada amostra e pela solução da equação determinou-se a velocidade de mínima fluidização teórica de cada amostra.

Como foi utilizado o diâmetro característico ajustado para o cálculo deste parâmetro, o valor encontrado para a u_{mf} também representa um valor generalizado para a mistura. O que significa que ao empregar velocidades do ar abaixo do valor de u_{mf} encontrado pode ocorrer a fluidização de algumas partículas, e que outras somente fluidizarão com velocidades igual ou acima da calculada. Os valores calculados encontram-se na Tabela 4.2:

Tabela 4. 3 – Velocidades de mínima fluidização teóricas para as amostras de biomassa pura

<i>Amostra</i>	<i>Velocidade de mínima fluidização (m/s)</i>
C1	1,62
C2	1,64

O que distingue a equação do balanço de forças (2.4) para cada amostra é a diferença entre as porosidades do leito, densidade e diâmetro característico das partículas. Como nenhum desses valores difere muito entre si, justifica o fato dos valores calculados para as u_{mf} serem semelhantes.

Outra razão pela qual a u_{mf} da biomassa foi determinada somente pela teoria é devido à restrição do equipamento utilizado. Nas Figuras 4.5 e 4.6 observa-se que a velocidade máxima obtida para as amostras de biomassa alcançou o valor de 1,5 m/s, logo, para alcançar a u_{mf} das amostras seria necessário um equipamento com maior potência.

4.3 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE AREIA

Para a determinação da velocidade de mínima fluidização foram realizados testes individuais para cada amostra de areia que resultaram em 283 pontos experimentais. Testes preliminares de fluidização mostraram que as areias A1 e B1, devido a sua distribuição granulométrica, apresentam visivelmente segregação das partículas maiores à medida que a areia começa a fluidizar. Essa segregação caracterizou-se como regiões de partículas maiores aglomeradas em alturas e pontos variáveis do leito, geralmente próximas as paredes. Diante da influência que o estado inicial do leito pode ter na determinação da u_{mf} , foi avaliado o comportamento das amostras tanto durante a fluidização, ao aumentar-se a vazão de ar, como na defluidização, ao diminuir-se a vazão de ar a partir do estado de fluidização completa. Sendo assim, para as amostras A1 e B1 foram realizados mais testes no intuito de avaliar o início da fluidização com o leito inicial misturado e segregado, separadamente. Este mesmo comportamento não foi observado para as amostras A2 e B2, que apresentam homogeneidade das partículas.

A altura de areia no leito para os testes foi determinada de maneira a não exceder a altura na qual se iniciava a elutrição das partículas, ou notava-se uma condição ineficiente de fluidização. A fluidização é considerada adequada quando, ao aumentar a velocidade do ar observar-se um regime borbulhante e sem a formação de canais preferenciais, aglomerações e segregação das partículas (Clarke *et al.*, 2005). Formisani *et al.*, 2001 recomendam utilizar uma razão da altura do leito (L) em relação ao diâmetro do equipamento (D_c) entre 1 e 2, logo, também foi definida uma altura mínima que respeitasse essas condições.

Os valores das alturas de leito utilizadas para cada teste de cada amostra podem ser visualizados na Tabela 4.4. Os pontos experimentais podem ser visualizados nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10.

Tabela 4. 4 – Alturas de leito (L) dos testes realizados para as amostras A1, A2, B1 e B2.

<i>Teste</i>	<i>Altura do leito (m)</i>			
	<i>Amostra A1</i>	<i>Amostra A2</i>	<i>Amostra B1</i>	<i>Amostra B2</i>
1	0,135	0,085	0,09	0,085
2	0,135	0,15	0,09	0,15
3	0,095	-	0,15	-
4	0,095	-	0,13	-
5	0,13	-	-	-

Não foram observadas diferenças significantes na perda de carga no leito quando a fluidização foi realizada com este inicialmente misturado ou segregado. Em geral, o comportamento do leito na fluidização e na defluidização foi semelhante para todos os testes. Nos pontos em que ocorreram diferenças nas medidas, essas se originavam da segregação que ocorria na defluidização, gerando menor perda de carga no leito. Porém, não é possível assumir que esta afirmação é válida para todos os pontos, pois houve medidas em que a perda de carga na defluidização apresentou-se maior.

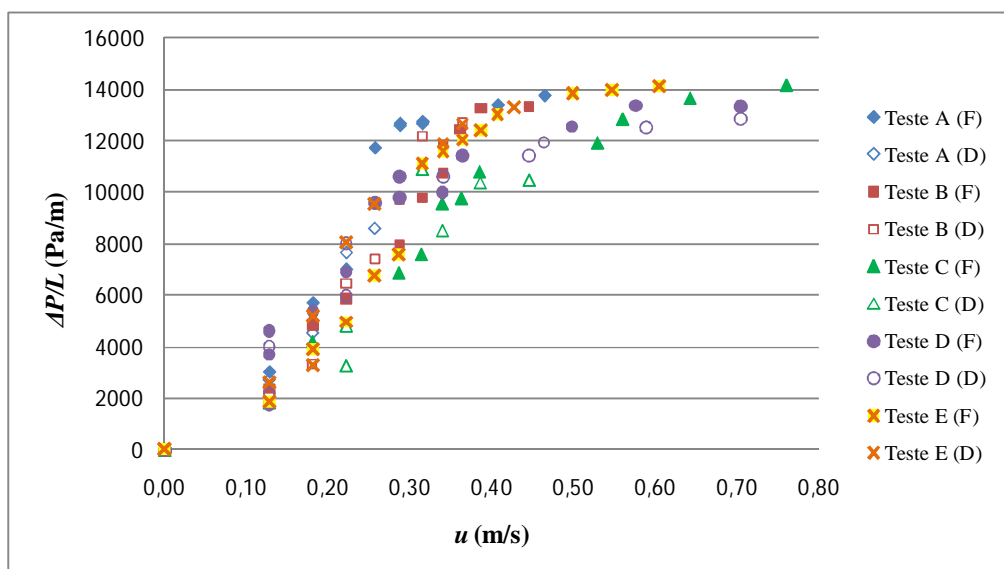


Figura 4. 7 – Dados de perda de carga para a amostra A1. (F – fluidização e D – defluidização)

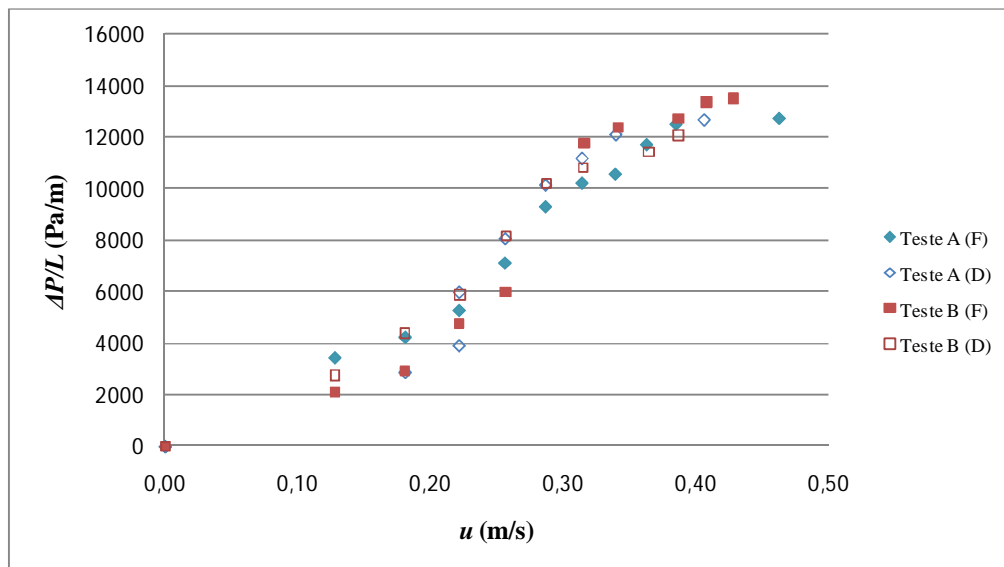


Figura 4. 8 – Dados de perda de carga para a amostra A2. (F – fluidização e D – defluidização)

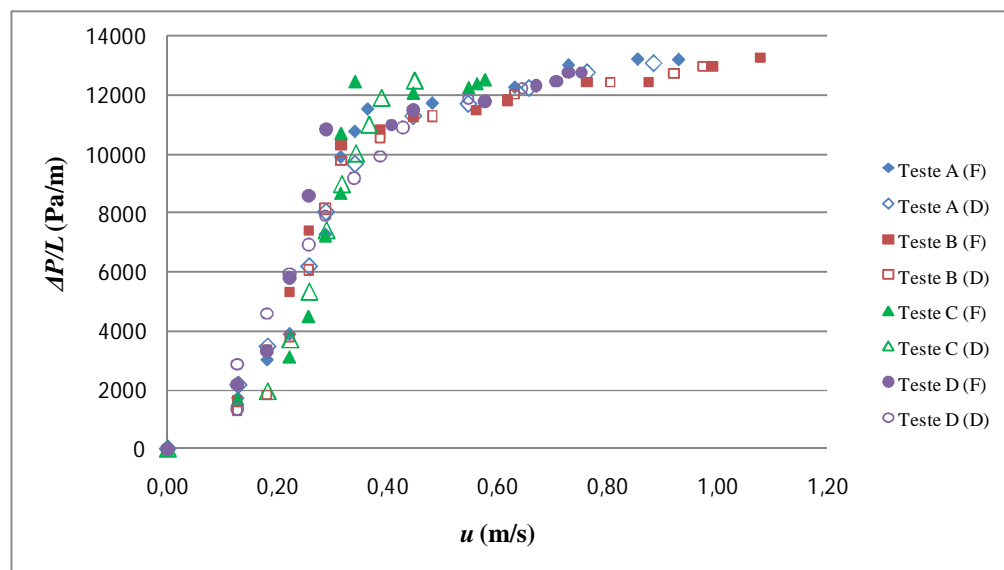


Figura 4. 9 – Dados de perda de carga para a amostra B1. (F – fluidização e D – defluidização)

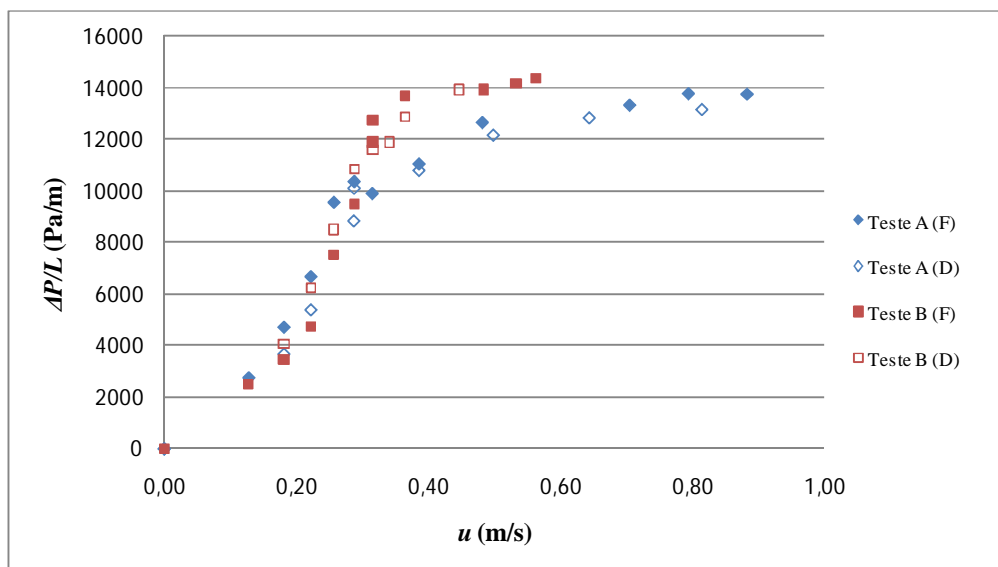


Figura 4. 10 – Dados de perda de carga para a amostra B2. (F – fluidização e D – defluidização)

Uma diferença perceptível entre as amostras é a velocidade máxima do ar alcançada. Para as amostras de biomassa, a vazão máxima de ar alcançada foi determinada pela restrição do próprio equipamento. Já para as amostras de areia, devido à elutriação das partículas, a vazão máxima foi determinada no ponto onde começava a ocorrer perda de material pela superfície aberta para a atmosfera. Logo, para cada amostra foi alcançada uma velocidade máxima respectiva, relacionada com a densidade e tamanho das partículas.

Outra questão a ser considerada nas medidas experimentais é a ocorrência de erros sistemáticos na leitura dos manômetros utilizados. Para vazões de ar elevadas, a oscilação do líquido dos manômetros gerou grande dificuldade na medição dos pontos e pode ter originado grande variação nas medidas para pontos de mesma velocidade do ar.

A determinação das u_{mf} das amostras de areia foi realizada de duas maneiras distintas: experimentalmente, fazendo-se uso de métodos gráficos; e teoricamente, pela aplicação de modelos de previsão da u_{mf} encontrados na literatura.

4.3.1 Determinação gráfica da velocidade de mínima fluidização das amostras de areia

Como visto no item 2.2.2.2 (sistemas monodispersos), graficamente, o ponto de u_{mf} , segundo Chiba *et al.* (1979), localiza-se na interseção da linha da queda de pressão em leito fixo com a linha obtida na fluidização completa. Ou ainda, segundo Kunii e Levenspiel

(1991), na interseção da linha de queda de pressão em leito fixo com a reta horizontal do peso por unidade de área da coluna.

Para o cálculo da u_{mf} segundo Chiba *et al.* (1979) utilizaram-se os dados de todos os testes realizados, reunidos num só gráfico para cada amostra, porém divididos em curvas de fluidização e de defluidização devido à influência que ambas as curvas podem ter na u_{mf} . Com auxílio do MSExcel foram traçadas as linhas de tendência representativas do leito fixo e da fluidização total. As curvas e suas respectivas regressões podem ser observadas na Figura 4.11. Do encontro das linhas representativas de leito fixo e fluidização completa mostradas nos gráficos foram calculadas as u_{mf} . O resumo dos valores encontrados pode ser visualizado na Tabela 4.5.

Tabela 4. 5 – Resumo dos valores de u_{mf} determinados graficamente segundo Chiba *et al.* (1979)

<i>Amostra</i>	<i>Velocidade de mínima fluidização (m/s)</i>		
	<i>Fluidização</i>	<i>Defluidização</i>	<i>Fluidização - Defluidização</i>
A1	0,395	0,358	- 0,037
A2	0,372	0,341	-0,031
B1	0,420	0,381	-0,039
B2	0,378	0,382	+0,004

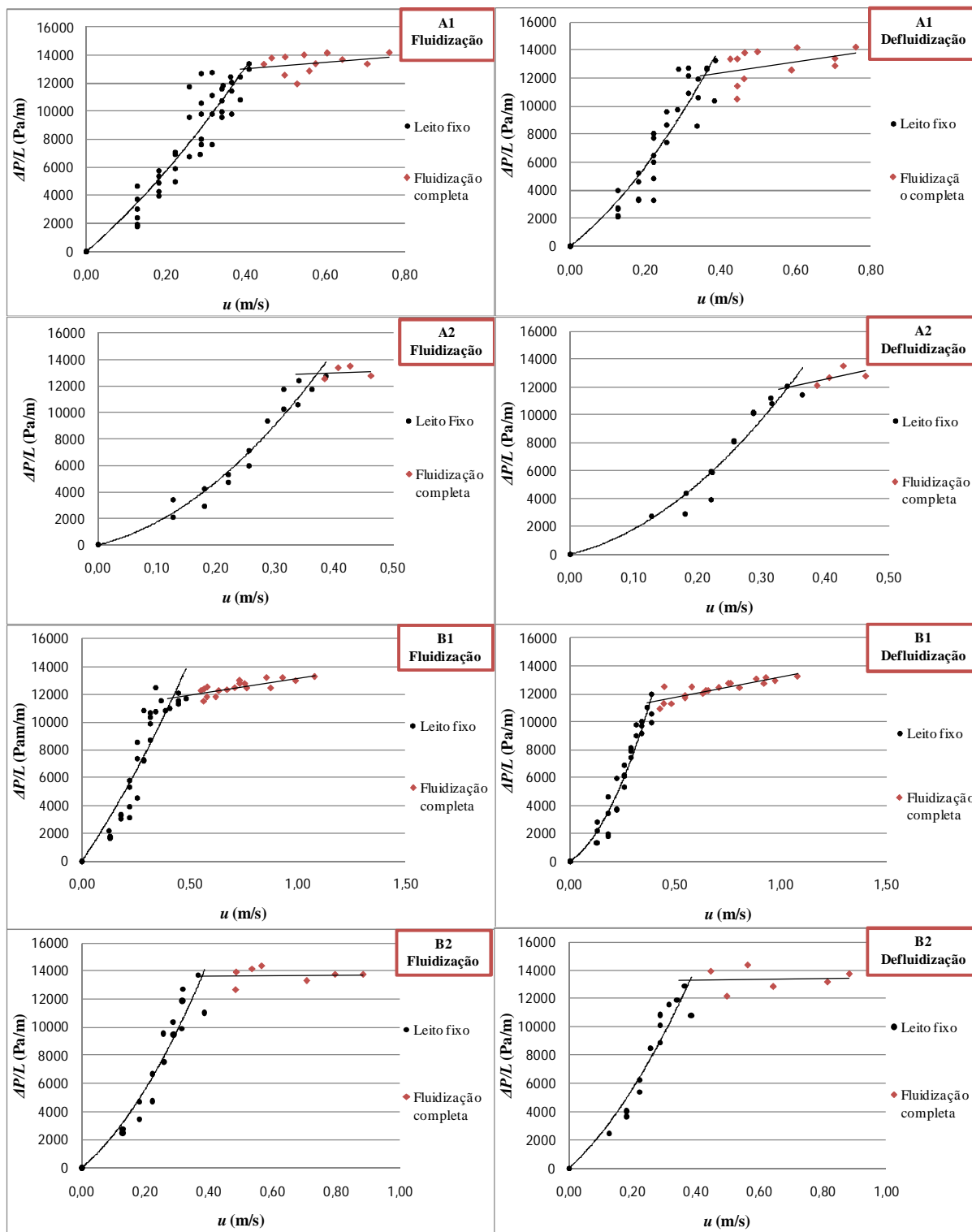


Figura 4. 11 – Dados de fluidização para a amostra B2 e respectivas linhas de tendência

Para a aplicação do método gráfico segundo Kunii e Levenspiel (1991) empregaram-se as equações de regressão polinomial para o leito fixo determinadas pelos gráficos anteriores. Como foram realizados vários testes e em cada teste uma massa diferente de material foi utilizada, calculou-se uma média desses valores e de altura do leito. Com as curvas de leito fixo e as retas de peso por unidade de área calculou-se a interseção destas e obteve-se o valor da u_{mf} para cada amostra, tanto na fluidização como na defluidização. Os valores obtidos podem ser analisados na Tabela 4.6.

Tabela 4. 6 – Resumo dos valores de u_{mf} determinados graficamente segundo Kunii e Levenspiel (1991)

<i>Amostra</i>	<i>Velocidade de mínima fluidização (m/s)</i>		
	<i>Fluidização</i>	<i>Defluidização</i>	<i>Fluidização - Defluidização</i>
A1	0,472	0,440	-0,032
A2	0,428	0,411	-0,017
B1	0,514	0,447	-0,067
B2	0,429	0,444	+0,015

O método de Kunii e Levenspiel (1991) utiliza a teoria do balanço de forças para prever teoricamente a reta de fluidização completa, e assim a velocidade de mínima fluidização, a qual deve ser a mesma que a encontrada pelos dados experimentais Chiba *et al.* (1979). Porém, pelas Tabelas 4.5 e 4.6 nota-se que os valores calculados pela aproximação de Kunii e Levenspiel (1991), apesar de próximos, foram superestimados em relação aos encontrados experimentalmente.

Como Kunii e Levenspiel (1991) levam em conta somente o peso e a área da coluna, outros fatores podem ter interferência nos valores finais, o que justificaria os valores experimentais encontrados. Dessa forma, foram adotados os valores determinados pelo método de Chiba *et al.* (1979) como as velocidades experimentais de mínima fluidização das amostras de areia.

4.3.2 Determinação teórica da velocidade de mínima fluidização das amostras de areia

Para a previsão da velocidade de mínima fluidização teórica foram aplicados modelos empíricos genéricos encontrados na literatura. Os modelos aplicados encontram-se

na Tabela 2.3 e podem ser aplicados para partículas homogêneas pertencentes aos grupos A e B de Geldart, fluidizadas com ar. Em geral, compreendidas numa ampla faixa de tamanhos ($0,058\text{mm} < d_p < 1,1\text{mm}$) e de número de Reynolds ($0,001 < Re < 4000$), nas quais estão incluídas as amostras de areia.

Todas as equações aplicadas baseiam-se no número de Arquimedes (Ar), o qual depende da viscosidade e densidade do fluido; e da densidade e tamanho das partículas sólidas. Os valores utilizados para as densidades das amostras de areia encontram-se na Tabela 3.1, e os diâmetros médios (d_p) e as faixas de diâmetro (diâmetros mínimos e máximos) das mesmas na Tabela 3.3. Para a densidade e viscosidade do ar foram utilizados os valores médios calculados de todos os testes e os valores encontrados foram os mesmos empregados nos cálculos da u_{mf} para as biomassas, os quais estão na Tabela 4.2.

Com todos os parâmetros definidos calcularam-se os valores do Ar , pela equação (2.6), para cada amostra. A faixa de diâmetros foi utilizada para visualização da influência do tamanho das partículas nas velocidades de mínima fluidização calculadas teoricamente. Obtidos os valores de Ar calcularam-se os valores de Re_{mf} pelas equações dos modelos de 1 a 12 da Tabela 2.3, para todos os diâmetros em questão. Pelos valores de Re_{mf} foi possível calcular os valores de u_{mf} utilizando-se a equação (2.7).

Para demonstração dos resultados plotaram-se os dados de velocidade de mínima fluidização obtidos pelos métodos gráficos segundo Chiba *et al.* (1979) e Kunii e Levenspiel (1991), juntamente com os valores obtidos aplicando cada modelo da Tabela 2.3 em cada diâmetro considerado. Uma visualização em forma de fluxograma pode ser visualizada na Figura 4.12. Os resultados podem ser observados nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16.

Para as amostras A1, A2 e B2 nota-se que os valores da u_{mf} calculada para o diâmetro médio ficaram bem abaixo dos valores encontrados experimentalmente. Uma das possíveis causas desse comportamento é o fato dos modelos servirem para conjuntos de partículas de tamanho e densidade homogêneas, e nos experimentos estarem sendo utilizadas partículas dentro de uma ampla faixa de tamanhos. Uma evidência deste fato são os resultados das u_{mf} calculadas para os diâmetros mínimos e máximos das faixas granulométricas das amostras. Nesses cálculos pode-se observar a influência do diâmetro utilizado nas u_{mf} previstas, pois a variação das u_{mf} dentro da faixa granulométrica de cada amostra foi muito grande. Outro fator a ser considerado para a diferença obtida entre os valores experimentais e os calculados é a possibilidade das partículas maiores estarem exercendo maior influência na determinação da velocidade, e por isso, as u_{mf} experimentais foram mais altas que as u_{mf} calculadas com o diâmetro médio. Essa consideração demonstra que o diâmetro médio calculado pelo diâmetro

de peneira poderia não estar representando bem toda a amostra, porém, ainda estaria dentro do intervalo esperado.

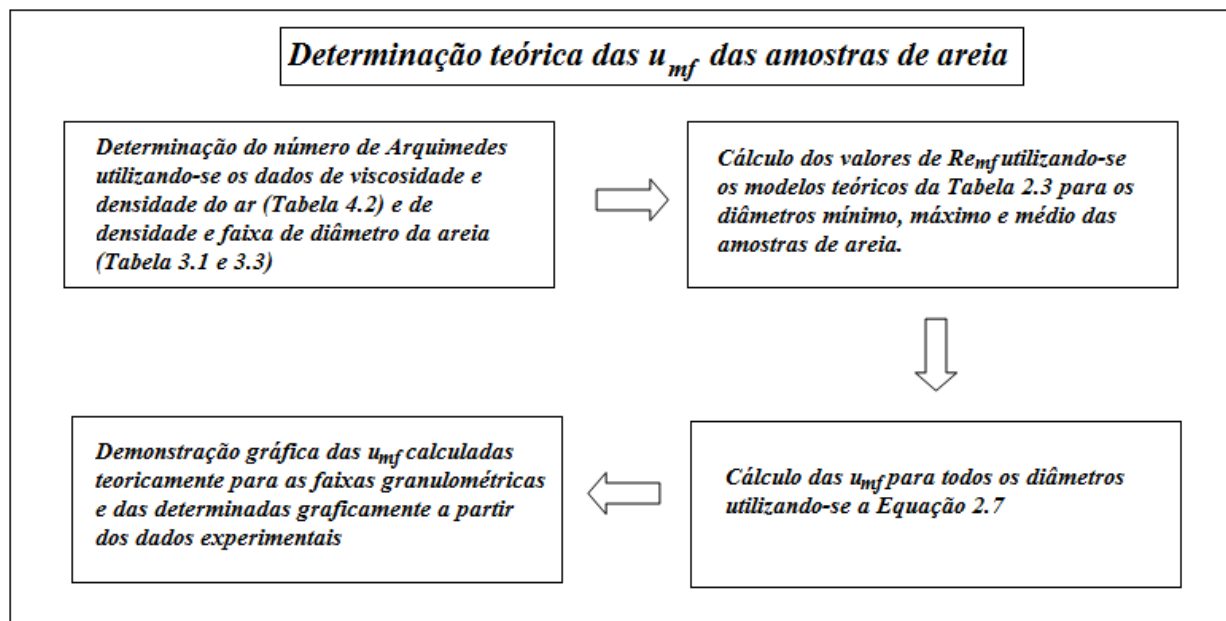


Figura 4. 12 – Visualização do procedimento utilizado para determinação das u_{mf} das amostras de areia.

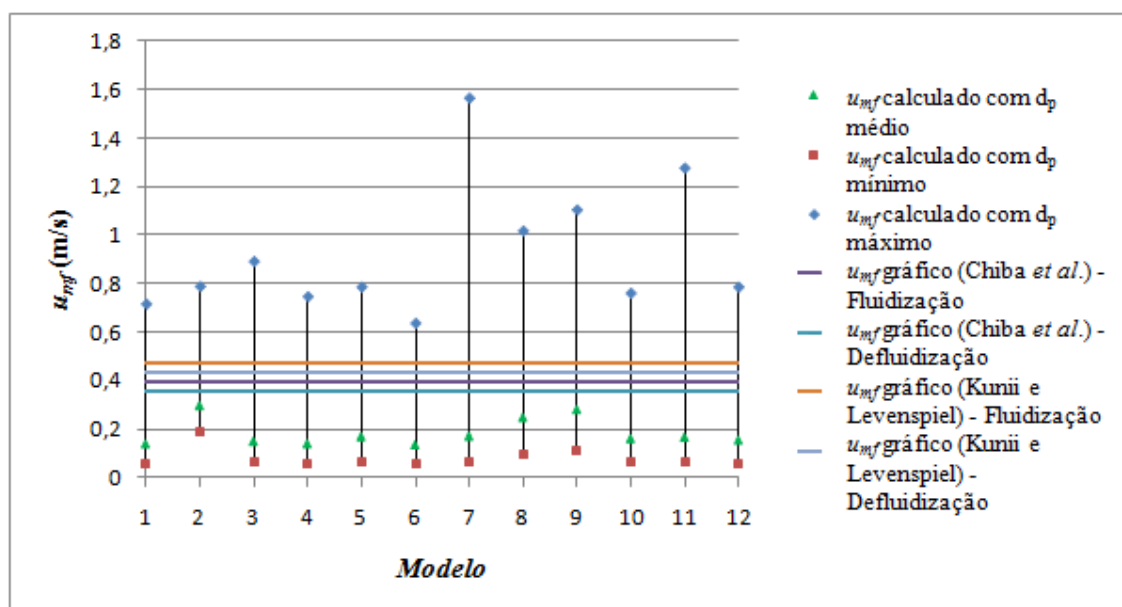


Figura 4. 13 – Resultados das u_{mf} obtidas experimentalmente e calculadas para a amostra A1

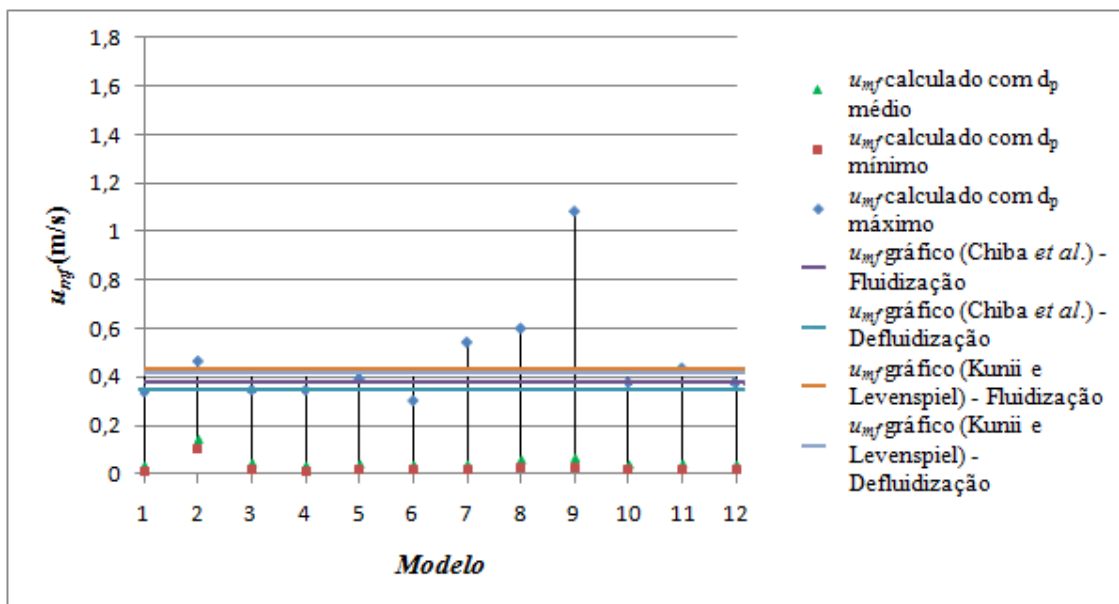


Figura 4. 14 – Resultados das u_{mf} obtidas experimentalmente e calculadas para a amostra A2

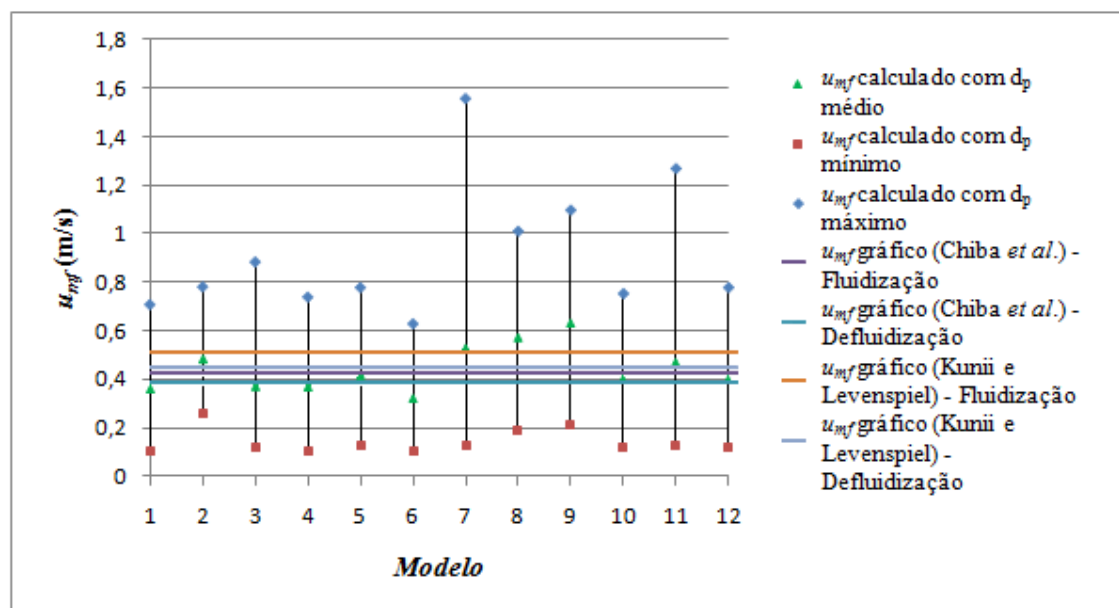


Figura 4. 15 – Resultados das u_{mf} obtidas experimentalmente e calculadas para a amostra B1

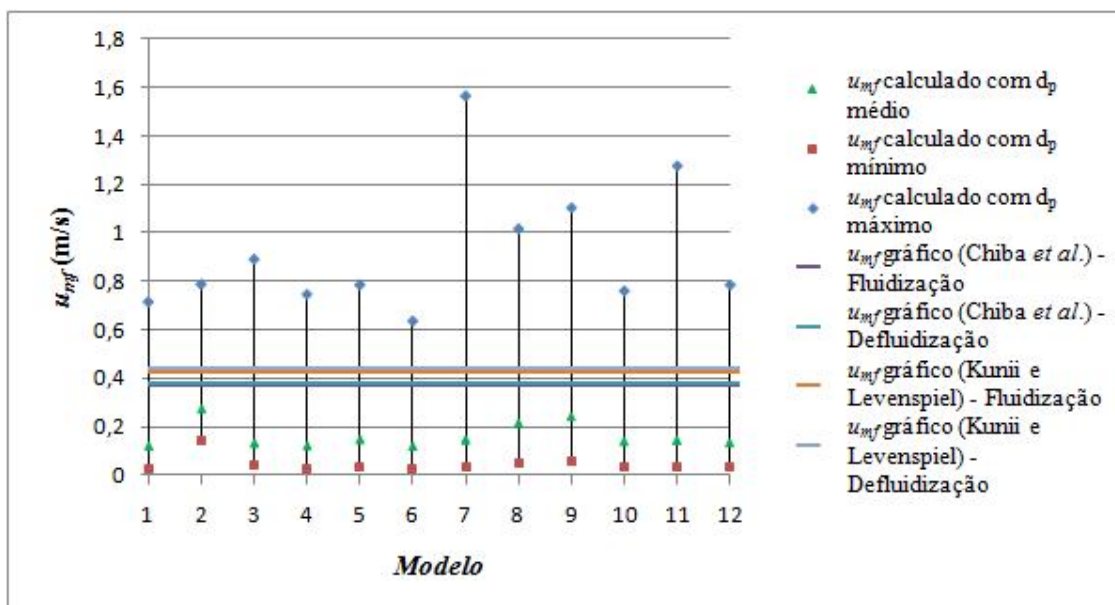


Figura 4. 16 – Resultados das u_{mf} obtidas experimentalmente e calculadas para a amostra B2

Uma exceção a essas considerações é a amostra B1, a qual teve seus valores de u_{mf} experimentais bem representados pela maioria dos modelos de previsão teórica da u_{mf} .

Como os modelos apresentaram valores calculados subestimados para os diâmetros médios e não apresentaram boa concordância entre si, continuam-se adotando os valores determinados pelo método de Chiba *et al.* (1979) como as velocidades experimentais de mínima fluidização das amostras de areia.

4.4 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO DAS MISTURAS DE AREIA E BIOMASSA

Para a determinação da velocidade de mínima fluidização das misturas de areia e biomassa foram preparadas amostras destas em diferentes porcentagens de biomassa como descrito no item 3.2.3. Utilizaram-se amostras de areia puras A1 e A2 juntamente com as biomassas C1 e C2 úmidas, ou seja, as matérias primas no seu estado original. As amostras de areia B1 e B2 apesar de estudadas individualmente no item anterior não serão utilizadas para os cálculos nesta etapa por conterem material orgânico já queimado em sua composição e corresponderem ao processo de combustão em leito fluidizado em andamento.

No processo da indústria fornecedora das matérias primas, as misturas de biomassa e areia são combinadas entre si de maneira que em cada caldeira de leito fluidizado é queimada apenas um tipo de areia com um tipo de biomassa. Dessa forma, para o procedimento experimental, também foram seguidas as mesmas combinações: amostra de areia A1 com a biomassa C1, denominada aqui de AC1 e areia A2 com biomassa C2, identificada como AC2.

Para cada combinação de areia e biomassa foram testadas cinco porcentagens diferentes, acrescentando-se uma quantidade de biomassa a cada porcentagem. Conforme observado anteriormente, a literatura sugere que seja utilizada até 10 – 15% em massa de biomassa, porém, devido à natureza do sistema, para valores mais altos que 5% a fluidização não foi satisfatória. A partir de uma quantidade específica de biomassa formavam-se aglomerados de partículas de biomassa os quais prejudicavam a fluidização e alteravam os resultados drasticamente.

As alturas do leito foram arbitradas da mesma maneira que para o procedimento das areias puras, respeitando o limite de altura necessário para prover uma boa fluidização e de maneira a não exceder a altura máxima em ocorria perda de material pela abertura superior do leito.

Antes do início de cada teste, depois de adicionada a respectiva quantidade de biomassa, abria-se a válvula na vazão máxima até atingir uma fluidização turbulenta, fechava-se rapidamente esta para que fosse atingido um grau de mistura adequado para o início do teste. Da mesma maneira como foi realizado para as areias puras, avaliou-se o comportamento das amostras tanto durante a fluidização como na defluidização.

Para a combinação AC1 os testes iniciaram com uma altura de leito de 13,5 cm, e para a AC2 com 12,5 cm. Para ambas as combinações essa altura refere-se à massa inicial de 3,9 kg de cada tipo de areia, utilizada para todos os testes. Todas as porcentagens de biomassa foram calculadas sobre esse valor total de areia.

Nesta etapa foram registrados 429 pontos experimentais de perda de carga em função da velocidade do ar. Os pontos experimentais das amostras AC1 e AC2 para todas as porcentagens aplicadas podem ser visualizados nas Figuras 4.17 e 4.18.

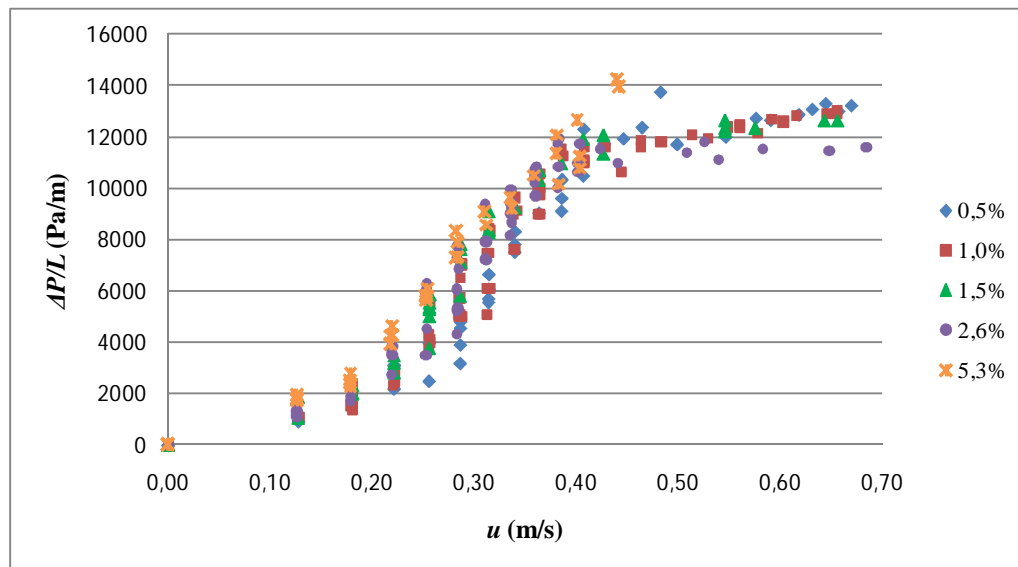


Figura 4. 17 – Dados de perda de carga em função da velocidade do ar para a amostra AC1

Apesar das Figuras 4.17 e 4.18 apresentarem curvas de comportamento muito semelhantes na visualização geral é necessário fazer uma análise mais profunda destas.

Para a amostra AC1, antes do início da fluidização, nota-se que quanto maior a quantidade de biomassa, maior é a perda de carga para a mesma velocidade do ar. É possível observar que alguns pontos não correspondem a essa afirmação, porém, analisando a porcentagem mássica mínima e máxima de biomassa verifica-se que o comportamento geral pode ser classificado desta maneira. De acordo com a teoria do balanço de forças aplicado ao sistema, o aumento do peso do leito causado pelo aumento da porcentagem de biomassa gera uma maior resistência à passagem do ar e eleva a perda de carga, comprovando essa afirmação. A partir do momento em que a velocidade de mínima fluidização é atingida, o padrão de comportamento se torna o oposto. Isso pode ser visualizado em torno da velocidade de 0,4 m/s, na qual as curvas de maior porcentagem de biomassa começam a apresentar menor perda de carga que as misturas de menor porcentagem. Segundo Formisani *et al.* (2000), a presença de uma camada de partículas mais grosseiras na parte inferior ou intermediária do leito atua temporariamente como um obstáculo ao progresso da fluidização e deixa de estar presente a partir do momento em que a velocidade aumenta gradativamente.

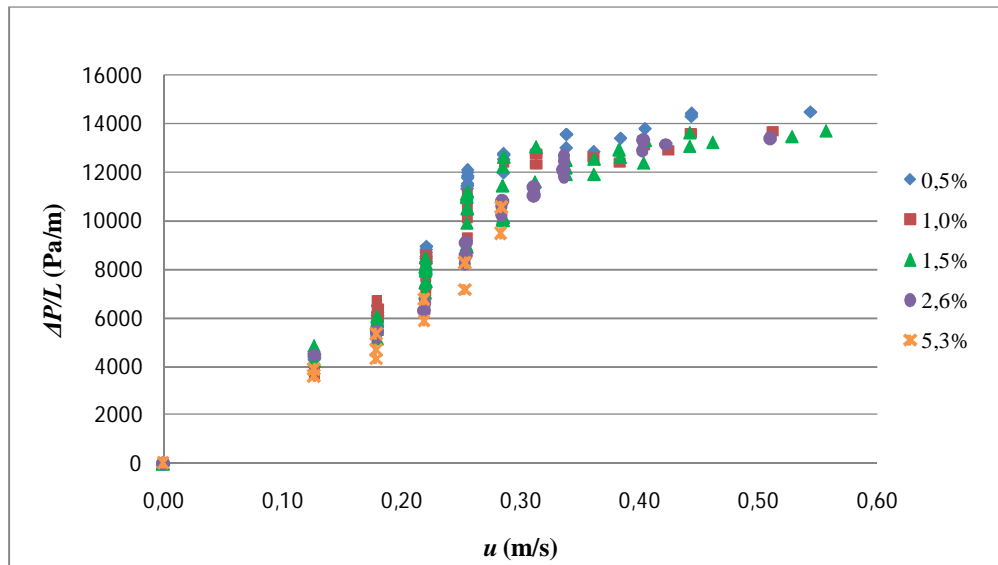


Figura 4. 18 – Dados de perda de carga em função da velocidade do ar para a amostra AC2

Para a mistura AC2, o comportamento desde o leito fixo até o ponto no qual se atinge o leito fluidizado, caracteriza-se pela diminuição da perda de carga com o aumento da porcentagem de biomassa. Acredita-se que o comportamento de ambas as misturas é justificado pelas diferenças nas características físicas entre os dois tipos de biomassa. Além da maior umidade, a presença de mais partículas longas e finas na amostra de biomassa C1 tende a gerar emaranhados de fibras no leito, os quais, juntamente com a areia, formam uma estrutura mais resistente ao fluxo de ar. Imagens da formação de emaranhados de fibras podem ser visualizados no Anexo 1. Já a amostra de biomassa C2, além de mais seca, apresenta-se na forma fragmentos de madeira maiores e no formato de cavacos, o que facilitaria a formação de canais preferenciais durante todo o experimento, gerando uma menor resistência ao fluxo e consequentemente menor perda de carga no leito.

Para as misturas de menor porcentagem de biomassa, tanto para AC1 como para AC2, a segregação não foi claramente observada. Mesmo ao final da defluidização as porcentagens de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,6% não apresentaram problemas quanto à formação de aglomerados nem separação das partículas. Para a porcentagem de 5,3%, acredita-se que uma das possíveis causas para a fluidização ineficiente é a interferência da segregação das partículas, causada pela diferença de densidade e de tamanho entre as partículas de areia e biomassa. Segundo Kunii e Levenspiel (1991), a quantidade de partículas que segregam varia com a vazão de gás no leito e logo que o gás tem sua velocidade acrescida acima da velocidade de mínima fluidização ocorre uma diminuição deste fenômeno. Como a vazão de

gás conferida pelo equipamento não consegue superar a velocidade exigida neste caso, esta foi a situação limitante para a quantidade de biomassa. Imagens de segregação das partículas de biomassa podem ser visualizados no Anexo 1.

Na Figura 4.17 observam-se alguns pontos de perda de carga elevados, principalmente para as porcentagens de 0,5 e 5,3%, os quais caracterizam a velocidade na qual o leito está na iminência de fluidizar. Na medida de velocidade seguinte, em geral, ocorre a fluidização repentina do leito, provocada por bolhas maiores de ar oriundas do aumento da velocidade e em geral é o ponto onde se inicia a fluidização, como exemplificado na Figura 2.6. A válvula utilizada no equipamento não permite o aumento constante e gradual da vazão de ar a cada medida, por isso não foi possível obter a perda de carga máxima do leito fixo antes que a fluidização iniciasse para todas as curvas.

Bem como para as amostras de areia, as velocidades de mínima fluidização para as misturas das amostras de areia e biomassa também foram determinadas de duas maneiras distintas. Graficamente, utilizando o conceito de Chiba *et al.* (1979) e de Kunii e Levenspiel (1991); e através dos modelos de previsão da u_{mf} encontrados na literatura citados no item 2.2.2.2 para sistemas polidispersos.

4.4.1 Determinação gráfica da velocidade de mínima fluidização das amostras de mistura de areia e biomassa

Para o cálculo das u_{mf} segundo Chiba *et al.* (1979) e Kunii e Levenspiel (1991) cada porcentagem de cada amostra foi estudada isoladamente, divididas em curvas de fluidização e de defluidização. Com auxílio do MSExcel foram traçadas as linhas de tendência representativas do leito fixo e da fluidização total. As u_{mf} foram calculadas pela interseção destas linhas segundo Chiba *et al.* (1979) e pela interseção da linha de tendência representativa do leito fixo com a reta do peso por unidade de área, como calculado para as areias puras.

As curvas e suas respectivas regressões para determinação das u_{mf} pelo método gráfico podem ser observadas nas Figuras 4.19 e 4.20. O resumo dos valores encontrados no cálculo das u_{mf} segundo Chiba *et al.* (1979) e segundo Kunii e Levenspiel (1991) encontra-se na Tabela 4.7.

Como não foi possível obter medidas de fluidização completa das misturas de 5,3%, para possibilitar a determinação gráfica, seguindo o padrão de comportamento das curvas anteriores, foram arbitrados pontos referentes a essas medidas. Para posterior utilização os valores de defluidização foram considerados iguais aos da fluidização neste caso.

Nota-se que os valores encontrados para a u_{mf} na fluidização quando comparados com a defluidização são diferentes, porém muito próximos entre si e com uma variação média de $\pm 0,02$ m/s. Tais valores não apresentam um comportamento padrão para todas as porcentagens, ora na defluidização são maiores que na fluidização, ora menores.

Já quando comparados os valores encontrados utilizando o conceito de mínima fluidização segundo Chiba *et al.* (1979) e segundo Kunii e Levenspiel (1991), os valores para Kunii e Levenspiel (1991) são sempre superestimados com relação aos valores dos primeiros autores. Este padrão de comportamento foi semelhante para os testes com areias puras.

Analisando todos os dados obtidos para a mistura AC1 contidos na Tabela 4.7 pode-se concluir que à medida que a porcentagem mássica de biomassa aumenta, a velocidade de mínima fluidização tende a diminuir. Quando analisados isoladamente os valores de fluidização, tanto por Chiba *et al.* (1979) como por Kunii e Levenspiel (1991), essa afirmação encontra-se em desacordo para alguns pontos. Porém, ao analisar somente a defluidização nota-se que esta tendência é confirmada tanto para os dados segundo Chiba *et al.* (1979) como segundo Kunii e Levenspiel (1991). Além disso, essa informação é ratificada pela tendência da variação da perda de carga discutida e justificada da Figura 4.16.

Para a mistura AC2 esse comportamento inverte-se e é possível observar que quanto maior a quantidade de biomassa adicionada maior a velocidade de mínima fluidização obtida graficamente. Essa informação justifica-se pelos dados de defluidização segundo Chiba *et al.* (1979), pela comparação e discussão das curvas obtidas na Figura 4.18.

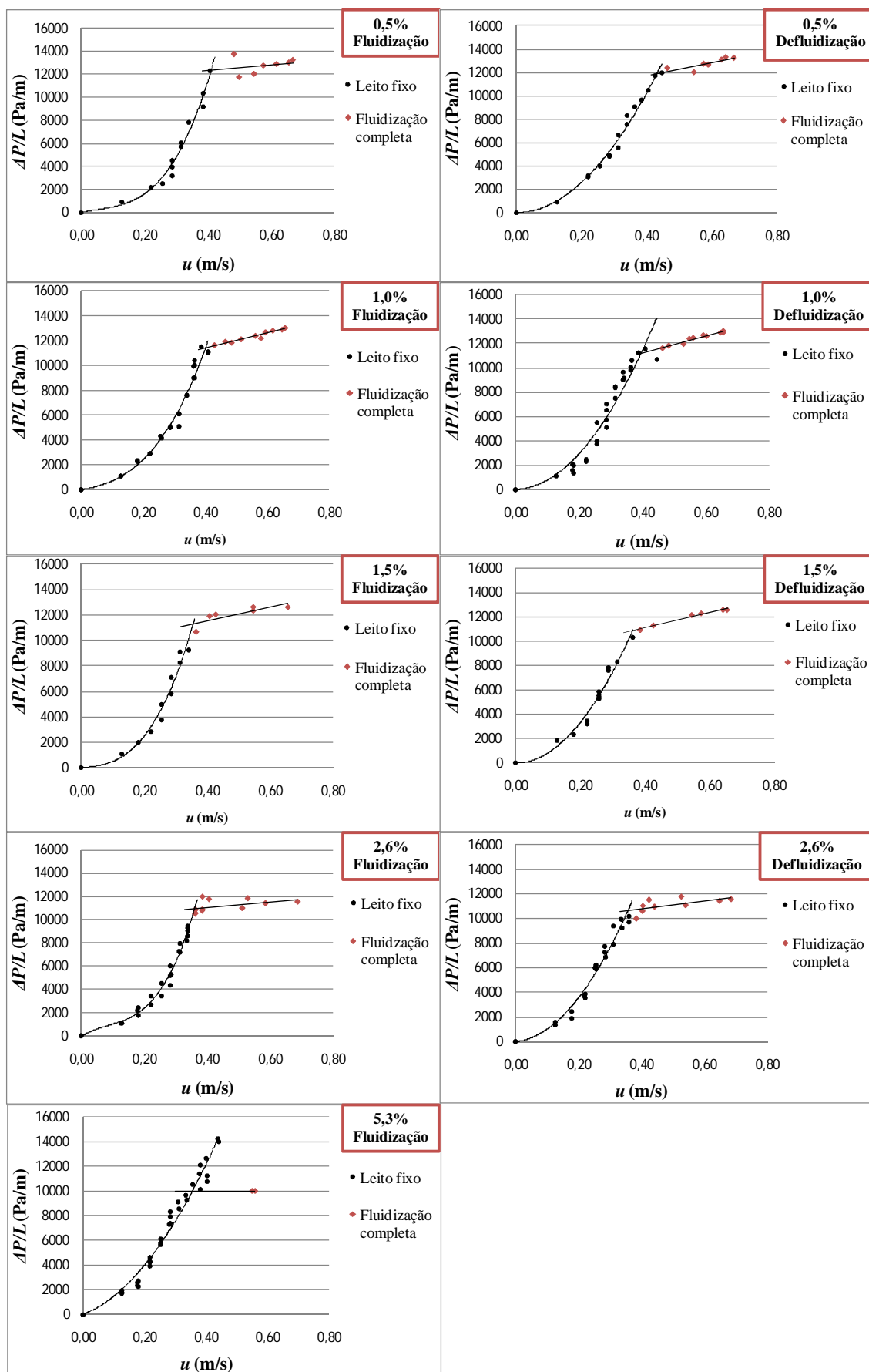


Figura 4. 19 – Dados de fluidização e defluidização para todas as porcentagens da mistura AC1 e respectivas linhas de tendência

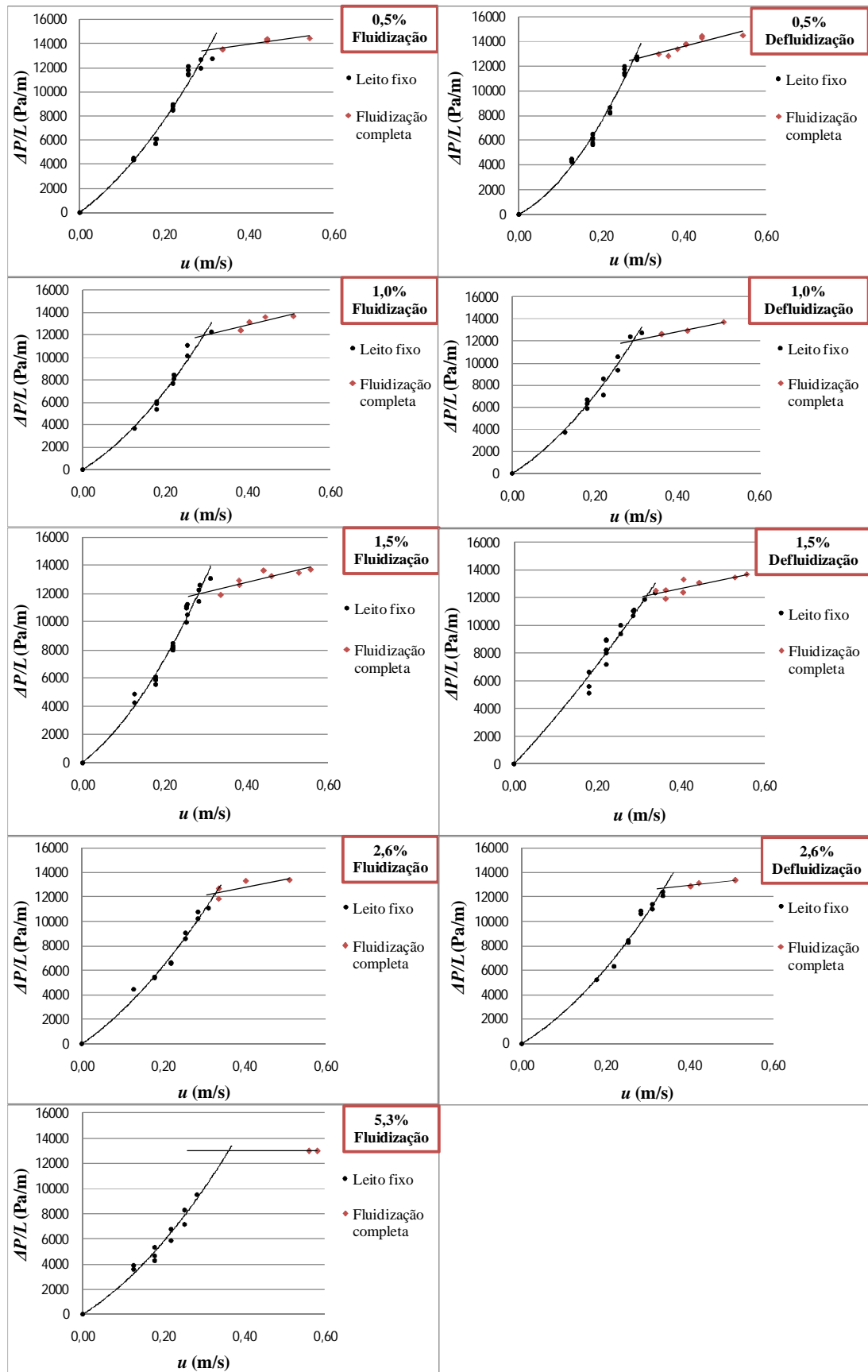


Figura 4. 20 – Dados de fluidização e defluidização para todas as porcentagens da mistura AC2 e respectivas linhas de tendência

Tabela 4. 7 – Resumos dos valores de u_{mf} determinados graficamente segundo Chiba *et al.* (1979) e Kunii e Levenspiel (1991) (F – Fluidização, D – Defluidização)

	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC1 (m/s)				$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC2 (m/s)			
% mássica de biomassa	Chiba <i>et al.</i> (1979)		Kunii e Levenspiel (1991)		Chiba <i>et al.</i> (1979)		Kunii e Levenspiel (1991)	
	F	D	F	D	F	D	F	D
0,5%	0,411	0,432	0,454	0,495	0,301	0,277	0,351	0,333
1,0%	0,400	0,396	0,456	0,470	0,294	0,293	0,372	0,370
1,5%	0,356	0,362	0,402	0,437	0,283	0,317	0,358	0,422
2,6%	0,359	0,358	0,401	0,432	0,329	0,339	0,416	0,415
5,3%	0,356	0,356	0,394	0,394	0,362	0,362	0,434	0,434

4.4.2 Determinação teórica da velocidade de mínima fluidização das amostras de mistura de areia e biomassa

Da mesma maneira que para sistemas monodispersos, sistemas polidispersos também podem ter sua velocidade de mínima fluidização prevista através de equações empíricas encontradas na literatura.

Devido à peculiaridade das partículas de biomassa utilizadas neste trabalho, não foi encontrado nenhum estudo similar que propusesse um modelo de previsão da velocidade de mínima fluidização específico para este sistema. Sendo assim, as equações aplicadas são modelos que se baseiam nos diâmetros, densidades, velocidades de mínima fluidização, frações mássicas e volumétricas das partículas puras que compõem a mistura, além das velocidades de mínima fluidização das misturas, encontradas graficamente.

As velocidades de mínima fluidização utilizadas para os cálculos dos modelos, tanto dos compostos puros quanto das misturas, foram os valores experimentais segundo Chiba *et al.* (1979) encontrados na defluidização dos sistemas. De acordo com Asif e Ibrahim (2002) os valores de fluidização apresentam grandes diferenças entre si, ao contrário da defluidização onde nota-se um comportamento comum para todas as misturas. Tal consideração nem sempre pode ser qualificada como verdadeira, pois em sistemas de partículas de biomassa pura, como no caso da serragem, a defluidização tende a deixar caminhos preferenciais residuais mesmo a baixas velocidades do ar. (Clarke *et al.*, 2005).

O primeiro modelo aplicado, proposto por Otero e Corella (1971), equação (2.9), utiliza somente as u_{mf} das biomassas e das areias puras, e as frações mássicas destas na mistura. Os resultados encontrados podem ser visualizados na Tabela 4.8.

Tabela 4. 8 – Valores de u_{mf} calculados por Otero e Corella (1971)

% biomassa	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC1 (m/s)	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC2 (m/s)
0,5	0,364	0,347
1,0	0,371	0,354
1,5	0,377	0,360
2,6	0,391	0,375
5,3	0,425	0,410

Este modelo foi empregado por Reina *et al.* (2000) para o cálculo da u_{mf} de sistemas com um só tipo de partícula pertencente a várias faixas granulométricas. A aplicação de Reina *et al.* (2000) difere-se no cálculo das u_{mf} das porções que compõem o sistema utilizando simplificações. Tal aplicação não pôde ser realizada ao presente estudo pela difícil caracterização da esfericidade das partículas de biomassa utilizadas neste trabalho e pela falta de dados da porosidade do leito de partículas de biomassa no início da fluidização, já que não foi viável a fluidização destas puras. Além disso, segundo Lucas *et al.* (1986), a generalização da esfericidade de um sistema de partículas complexas pode gerar um erro significativo na determinação da u_{mf} .

Asif e Ibrahim (2002) propuseram uma modificação no modelo de Otero e Corella (1971), na qual se introduz um coeficiente p na equação que, quando igualado a -1 representa a média harmônica e igualado a 1 representa a média ponderada. É possível ainda utilizar valores intermediários entre estes para se obter melhores predições. O modelo foi aplicado para valores de p iguais a -1 e -0,5. (equação 2.10) e seus resultados encontram-se na Tabela 4.9.

Tabela 4. 9 – Valores de u_{mf} calculados por Otero e Corella modificado

% biomassa	$p = -0,5$		$p = -1,0$	
	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC1 (m/s)	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC2 (m/s)	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC1 (m/s)	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC2 (m/s)
0,5	0,366	0,348	0,363	0,346
1,0	0,373	0,356	0,368	0,351
1,5	0,381	0,363	0,373	0,355
2,6	0,398	0,380	0,384	0,366
5,3	0,441	0,422	0,411	0,392

Apesar do estudo de Asif e Ibrahim (2002) ter utilizado o modelo de Otero e Corella modificado para fluidização de sólidos em líquidos, seus dados experimentais foram correlacionados de maneira eficiente para os sistemas binários estudados.

O modelo proposto por Cheung *et al.* (1974) classifica os compostos da mistura como partículas grandes e pequenas, que neste caso referem-se à biomassa e à areia respectivamente. Apesar de ser um modelo mais antigo, o modelo de Cheung *et al.* (1974) é bastante aplicado em trabalhos recentes. Os valores encontrados quando aplicada a equação (2.11) às misturas AC1 e AC2 podem ser visualizados na Tabela 4.10.

Tabela 4. 10 – Valores de u_{mf} calculados por Cheung *et al.* (1974)

% biomassa	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC1 (m/s)	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC2 (m/s)
0,5	0,3580	0,3410
1,0	0,3581	0,3411
1,5	0,3581	0,3411
2,6	0,3584	0,3414
5,3	0,3595	0,3425

O modelo de Rao e Bheemarasetti (2001), referente às equações (2.12), (2.13) e (2.14), foi aplicado às misturas AC1 e AC2. Os resultados da aplicação podem ser visualizados na Tabela 4.11.

Tabela 4. 11 – Valores de u_{mf} calculados por Rao e Bheemarasetti (2001)

% <i>biomassa</i>	$\overline{u_{mf}}$ <i>da mistura AC1 (m/s)</i>	$\overline{u_{mf}}$ <i>da mistura AC2 (m/s)</i>
0,5	0,361	0,319
1,0	0,367	0,328
1,5	0,374	0,338
2,6	0,388	0,360
5,3	0,429	0,424

Alguns modelos de predição da u_{mf} de sistemas binários levam em consideração as diferenças de densidade e tamanho entre as partículas ao determinar diferentes modelos para leitos que apresentam segregação e para os que não apresentam. Um dos modelos estudados é o trabalho de Chiba *et al.* (1979), no qual as partículas de menor densidade são denominadas *flotsam* e as de maior densidade *jetsam*, considerados neste trabalho como a biomassa e a areia, respectivamente. O modelo de Chiba *et al.* (1979) utiliza as frações volumétricas de areia nas misturas AC1 e AC2, cujos valores calculados encontram-se entre 86,6 e 98,6%. Foram empregados modelos para leitos completamente misturados e completamente segregados (equações 2.15 – 2.19) cujos resultados se encontram na Tabela 4.12.

Outro trabalho com enfoque na influência da segregação das partículas na velocidade de mínima fluidização de misturas é o de Formisani *et al.* (2001). Formisani *et al.* (2001) propõem um modelo baseado na equação de Carman-Kozeny que leva em consideração a variação axial da porosidade e do diâmetro médio das partículas no leito. No seguinte trabalho tais informações foram obtidas pelo “congelamento” da fluidização e retirada das diversas camadas do leito. Diante da inviabilidade deste procedimento, o estudo de Formisani *et al.* (2001) teve importância somente qualitativa para o estudo da segregação no presente trabalho.

Tabela 4. 12 – Valores de u_{mf} calculados por Chiba *et al.* (1979)

% biomassa	<i>Leito completamente misturado</i>		<i>Leito completamente segregado</i>	
	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC1 (m/s)	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC2 (m/s)	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC1 (m/s)	$\overline{u_{mf}}$ da mistura AC2 (m/s)
0,5	0,3580	0,3411	0,3594	0,3424
1,0	0,3580	0,3413	0,3608	0,3437
1,5	0,3580	0,3414	0,3622	0,3451
2,6	0,3581	0,3418	0,3654	0,3482
5,3	0,3586	0,3431	0,3734	0,3559

Para comparação de todos os valores de u_{mf} encontrados experimental e teoricamente, os dados foram plotados em função das porcentagens de biomassa utilizadas e podem ser visualizados nas Figuras 4.21 e 4.22.

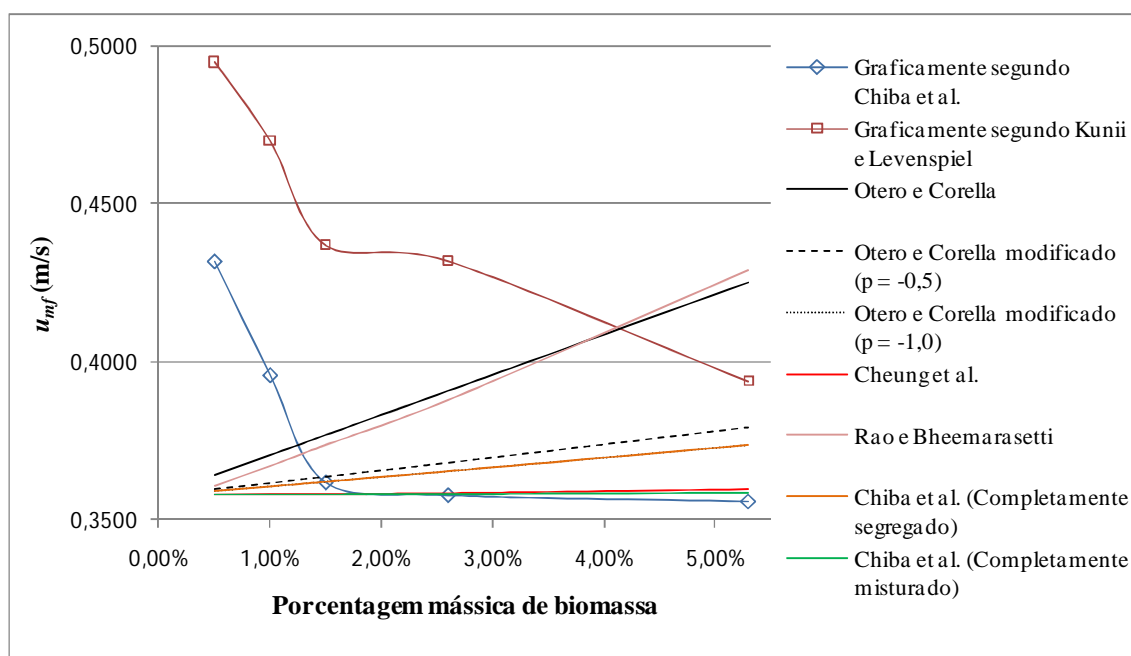


Figura 4. 21 – Comparação entre as u_{mf} encontradas graficamente e calculados pelos modelos empíricos para a mistura AC1

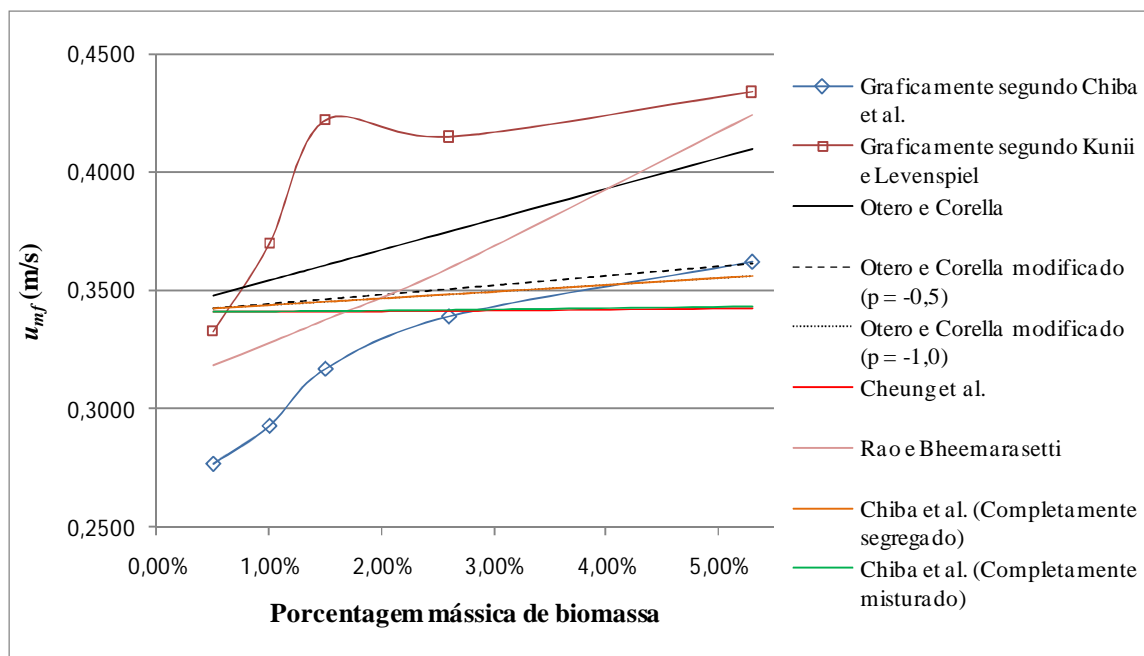


Figura 4. 22 – Comparação entre as u_{mf} encontradas graficamente e calculados pelos modelos empíricos para a mistura AC2

De acordo com as Figuras 4.21 e 4.22, observa-se que a mistura AC1 não é bem representada por nenhum dos modelos empíricos propostos. O comportamento encontrado diverge de todos dados previstos nas literaturas estudadas. Acredita-se que os resultados encontrados, como comentado anteriormente, têm relação com as características físicas da biomassa C1.

A amostra AC2 apresenta resultados que correspondem de maneira mais eficiente aos dados esperados. Como as partículas de biomassa puras têm valores de u_{mf} em torno de 1,6 m/s, e as de areia pura 0,35 m/s, fica claro que a adição de partículas menores de alta densidade diminui consideravelmente a velocidade de mínima fluidização do sistema, como previsto por Asif e Ibrahim (2002) e Clarke *et al.* (2005).

O modelo de Otero e Corella (1971) foi utilizado por Reina *et al.* (2000) os quais atribuíram os desvios encontrados às características coesivas das partículas empregadas. Tal justificativa é um fator a ser considerado para o presente estudo visto que as partículas de biomassa utilizadas também apresentam estas características.

Nota-se que os resultados da aplicação do modelo de Otero e Corella (1971) modificado para $p = -1$ coincidem com o modelo de Chiba *et al.* (1979) para partículas

completamente segregadas. Bem como o modelo de Cheung *et al.* (1974), o qual teve seus valores muito próximos de Chiba *et al.* (1979) para sistemas completamente misturados.

Aznar *et al.* (1992 a,b) defendem que os métodos gráficos aplicados a partir dos dados experimentais ainda são a melhor maneira de se obter dados mais coerentes das u_{mf} reais, bem como Rao e Bheemarasetti (2001) que utilizaram os dados experimentais obtidos para modificar o modelo de Kunii e Levenspiel (1969) pelo uso da constante k , e desenvolveram um modelo para o próprio sistema específico estudado.

Os modelos que aplicam o fenômeno da segregação no cálculo da previsão da u_{mf} são de difícil utilização, pois não foi realizado um estudo profundo quanto à concentração axial de cada tipo de partícula em cada região do leito.

Com exceção dos modelos de Otero e Corella (1971) e de Rao e Bheemarasetti (2001) todos os outros modelos aplicados ao estudo demonstraram uma variação muito pequena para porcentagens de 0,5 a 5,3% de biomassa. Segundo esses modelos, maiores quantidades de biomassa seriam necessárias para obter grandes diferenças nas u_{mf} encontradas.

5 CONCLUSÕES

Em relação à fluidização da biomassa utilizada nos processos industriais, objeto desse estudo, foi verificado que o desenvolvimento de ensaios experimentais em escala laboratorial ou piloto é essencial para o estudo de um sistema com tal especificidade e que não tem semelhança a nenhum outro trabalho encontrado na literatura.

Os resultados referentes à determinação de um diâmetro característico para a amostra de biomassa representaram de maneira eficiente o conjunto de dados experimentais e acredita-se que o método utilizado seja válido para o problema em questão. As u_{mf} calculadas para as amostras de biomassa a partir do diâmetro característico obtido, apesar de ser uma previsão teórica, foi coerente com o esperado.

As u_{mf} calculadas para as amostras areia a partir dos métodos gráficos de Chiba *et al.* (1979) e de Kunii e Levenspiel (1991) aplicados às medidas experimentais mostraram-se satisfatórios, porém, verificou-se que os valores segundo Kunii e Levenspiel (1991) superestimaram os valores obtidos. Os valores de u_{mf} experimentais não coincidiram com os valores calculados pelos modelos matemáticos teóricos para o diâmetro médio considerado de cada amostra, porém, permaneceram dentro dos limites quando consideradas as faixas granulométricas.

Ensaio experimentais com as misturas de biomassa e inerte corresponderam aos previstos na literatura ao considerarmos que a adição de partículas menores de alta densidade diminui consideravelmente a u_{mf} do sistema, como previsto por vários autores. Apesar de as amostras de biomassa apresentarem semelhanças entre si, o comportamento de cada amostra apresentou-se de maneira muito particular. Os cálculos das u_{mf} obtidos pelos modelos teóricos não foram condizentes com os valores experimentais calculados pelos métodos gráficos. O efeito de segregação das partículas necessitaria de investigações mais detalhadas para prever sua influência em relação à composição das misturas.

A utilização de um compressor de ar com maior potência, uma válvula de controle da vazão de ar de maior precisão, uma coluna com maior altura de leito e com um ciclone acoplado, além de medidores de perda de carga mais precisos enriqueceriam o estudo, uma vez que possibilitariam a determinação das características hidrodinâmicas do leito fluidizado com velocidades muito superiores à da mínima fluidização. Da mesma forma, a utilização de

um leito de maior diâmetro possibilitaria a determinação da influência das paredes na formação dos aglomerados de biomassa. Também seria interessante fazer um estudo da possibilidade de um pré-tratamento da biomassa utilizada industrialmente, visando a sua homogeneização de tamanho e composição, e, por consequência, a operação do leito em um estado mais estável.

Como sugestão para trabalhos futuros seria de grande interesse o desenvolvimento de equações específicas para determinação de perda de carga no leito e velocidade de mínima fluidização para o caso estudado. Posteriormente, o estudo hidrodinâmico poderia embasar um estudo da cinética da queima do resíduo, em condições operacionais, visando caracterizar e otimizar a eficiência energética e a emissão de resíduos.

REFERÊNCIAS

ALLEN, T. **Particle Size Measurement**. Powder Technology Series, Chapman & Hall, 4^a edição, p. 125-126, London, 1990.

ARAÚJO, D. de S. S. de. **Co-combustão de biomassa e carvão em leito fluidizado: Impactes nas emissões atmosféricas de NO_x, SO₂, CO, Dioxinas e Furanos e Material Particulado**. 141p. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

ASIF, M.; IBRAHIM, A. A. Minimum fluidization velocity and defluidization behavior of binary-solid liquid-fluidized beds. **Powder Technology**, v. 126, p. 241-254, 2002.

ASTM INTERNATIONAL STANDARDS WORLWIBE. **Standard specification for industrial wire cloth and screen (square opening series)**. Pennsylvania, 1997.

AZNAR, M. P.; GRACIA-GORRIA, F. A.; CORELLA, J. Minimum and maximum velocities for fluidization for mixtures of agricultural and forest residues with second fluidized solid. I. Preliminary data and results with sand-sawdust mixtures. **International Chemical Engineering**, v. 32, p. 95–102, 1992.

AZNAR, M. P.; GRACIA-GORRIA, F. A.; CORELLA, J. Minimum and maximum velocities for fluidization for mixtures of agricultural and forest residues with second fluidized solid. II. Experimental results for different mixtures. **International Chemical Engineering**, v. 32, p. 103–113, 1992.

BABU, S. P.; SHAH, B.; TALWALKAR, A. Fluidization correlations for coal gasification materials – minimum fluidization velocity and fluidized bed expansion ratio. **A.I.Ch.E. Symposium Series**, v. 74, p. 176-186, 1978.

BARBOSA, A.; STEINMETZ, D.; ANGELINO, H. **Fluidization VIII**, vol. 1, Laguérie and Large, Tours, p. 145 – 153, 1995.

BILBAO, R.; LEZAUN, J.; ABANADES, J. C. Fluidization velocities of sand/straw binary mixtures. **Powder Technology**, v. 52, p. 1 – 6, 1987.

BOURGEOIS, P.; GRENIER, P. Ratio of terminal velocity to minimum fluidization velocity for spherical particles. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 46, p. 325, 1968.

CHEUNG, L., NIENOW, A. W., ROWE, P. N. Minimum fluidization velocity of a binary mixture of different sized particles. **Chemical Engineering Science**, v. 29, p. 1301-1303, 1974.

CHIBA, S. *et al.* The minimum fluidization velocity, bed expansion and pressure-drop profile of binary particle mixtures. **Powder Technology**, v. 22, p. 255-269, 1979.

CLARKE, K. L.; PUGSLEY, T.; HILL, G. A. Fluidization of moist sawdust in binary particle systems in a gas-solid fluidized bed. **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 6909-6918, 2005.

CUI, H.; GRACE, J. R. Fluidization of biomass particles: a review of experimental multiphase flow aspects. **Chemical Engineering Science**, v. 62, p. 45-55, 2007.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982

DOICHEV, K.; AKHMAKOV, N. S. Fluidization of polydisperse systems. **Chemical Engineering Science**, v. 34, p. 1357-1359, 1979.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, p. 1179-1184, 1952.

FORMISANI, B.; CRISTOFARO, G. de.; GIRIMONTE, R. A fundamental approach to the phenomenology of fluidization of size segregating binary mixtures of solids. **Chemical Engineering Science**, v. 56, p. 109-119, 2001.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GAUTHIER, D.; ZERGUERRAS, S.; FLAMANT, G. Influence of the particle size distribution of powders on the velocities of minimum and complete fluidization. **Chemical Engineering Journal**, v. 74, p. 181-196, 1999.

GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**. John Wiley & Sons, New York, 1986.

GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 285-292, 1973.

GREWAL, W. S.; SAXENA, G. S. Comparison of commonly used relations for minimum fluidization velocity of small solid particles. **Powder Technology**, v. 26, p. 229-238, 1980.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5167-4**: measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular crosssection conduits running full: part 4: venturi tubes. Genebra, 2003.

KHAN, A. A. *et al.* Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. **Fuel Processing Technology**, v. 90, p. 21-50, 2009.

KUNII D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. John Wiley & Sons, New York, 1969.

KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Butterworth- Heinemann, 2^a edição, Boston, 1991.

LIN, C. L.; WEY, M. Y.; YOU, S.D. The effect of particle size distribution on minimum fluidization velocity at high temperature. **Powder Technology**, v. 126, p. 297-301, 2002.

LUCAS, A. *et al.* High temperature incipient fluidization in mono and poly disperse systems. **Chemical Engineering Community**, v. 41, p. 121-132, 1986.

MACEDO, J. C. F. **Análise térmica e ambiental da queima do lodo primário da fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa à grelha**. 196p. Dissertação (Mestrado em Conservação de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

MOTTA, E. P. **Queda de pressão em um leito de partículas de xisto: Avaliação de modelos para distribuição granulométrica e diâmetros médios equivalentes, estudo do efeito da altura do leito e avaliação de modelos para predição da queda de pressão**. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2009.

NODA, K. *et al.* Minimum fluidization velocity of binary mixture of particles with large size ratio. **Powder Technology**, v. 46, p. 149-154, 1986.

OKA, S. N. **Fluidized Bed Combustion**. Marcel Dekker, Inc., New York, 2004.

OTERO, A. R.; CORELLA, J. **Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química**, v. 67, p. 1207, 1971.

PILLAI, B. C.; RAJA RAO, M. R. **Indian Journal Technology**, v. 9, p. 77, 1971.

RAO, T. R.; BHEEMARASETTI, J. V. R. Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands. **Energy**, v. 26, p. 33-644, 2001.

REINA, J.; VELO, E.; PUIGJANER, L. Predicting the minimum fluidization velocity of polydisperse mixtures of scrap-wood particles. **Power Technology**, v. 111, p. 245-251, 2000.

RESENDE, F. L. P. de. **Comparação entre as técnicas de análise termogravimétrica e leito fluidizado para pirólise de biomassa**. 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Térmica e fluidos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RICHARDSON, J. F.; JEROMINO, M. A. D. S. Velocity – voidage relations for sedimentation and fluidization. **Chemical Engineering Science**, v. 34, p. 1419-1422, 1979.

SAXENA, S. C.; VOGEL, G. L. The measurement of incipient fluidization velocities in a bed of coarse dolomite at temperature and pressure. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 55, p. 184-189, 1977.

SUBRAMANI, H. J.; BALAIYYA, M. B. M.; MIRANDA, L. R. Minimum fluidization velocity at elevated temperatures for Geldart's group-B powders. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, p. 166-173, 2007.

TANNOUS, K. **Contribution à l'étude hydrodynamique des lits fluidisés de grosses particules**. Tese de doutorado, INP – Toulouse, 1993.

THONGLIMP, V.; HIQUILY, N.; LAGUERIE, C. Minimal rate of fluidization and expansion of gas-fluidized layers. **Powder Technology**, v. 38, p. 233-253, 1984.

TODES, O. M.; GOROSHKOV, V. D.; ROZENBAUM, R. B. **Izv. Vyssh. Uchcbn. Zaved. Neft Gaz**, v. 1, p. 8, 1958.

WEN, C. Y.; YU, Y. H. A generalized method for predicting minimum fluidization velocity. **A.I.Ch.E. Journal**, v. 12, p. 610, 1966.

WEN, C. Y.; YU, Y. W. Mechanics of fluidization. **Chemical Engineering Progress Symposium Series**, v. 62, p. 100-125, 1966.

WU, S. Y.; BAEYENS, J. Segregation by size difference in gas fluidized beds. **Powder Technology**, v. 98, p. 139-150, 1998.

ZHONG, W. *et al.* Fluidization of Biomass Particles in a Gas-Solid Fluidized Bed. **Energy & Fuels**, v. 22, p. 4170-4176, 2008.

ANEXOS

Anexo 1 – Imagens de diferentes formações do leito



Formação de emaranhados para maiores concentrações de biomassa – Mistura AC1



Segregação das partículas de biomassa no final da defluidização – Mistura AC2